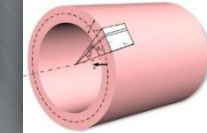
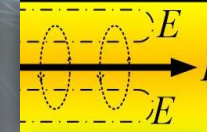
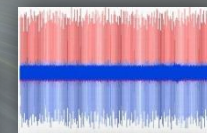
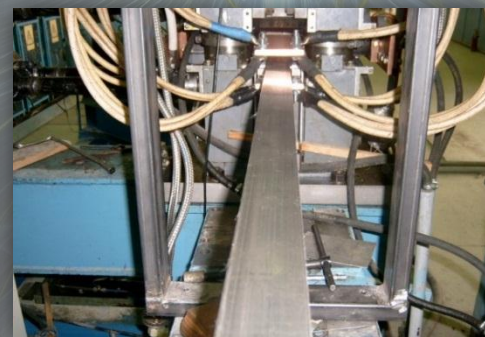
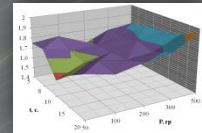
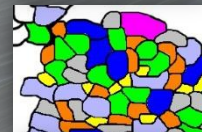
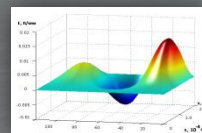


**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ  
ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА  
НА ПРОВОДНИКИ  
В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ  
И ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
СОВМЕСТНО С СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

МГТУ им. И.Г.Шамая

ISBN 978-985-477-694-1



Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Мозырский государственный педагогический университет  
имени И. П. Шамякина»

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ  
ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ПРОВОДНИКИ  
В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ  
И ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
СОВМЕСТНО С СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Мозырь  
МГПУ им. И. П. Шамякина  
2019

УДК 669.2.8:620.178.6

ББК 22.37

Э45

А в т о р ы:

О. А. Троицкий, В. С. Савенко, В. И. Сташенко  
О. Б. Скворцов, С. Д. Самуйлов, Е. А. Правоторова

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*Ю. Н. Бочаров;*

доктор технических наук, профессор кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*С. И. Кривошеев;*

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»

*А. С. Кошкин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина»

Э45 **Электродинамические** эффекты действия импульсного тока на проводники в статическом состоянии и при пластической деформации совместно с СВЧ-излучением / О. А. Троицкий [и др.]. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019. – 260 с.

ISBN 978-985-477-694-1.

В монографии обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований электропластического эффекта и показаны принципиальные возможности влияния на электронную подсистему металлов высоко энергетическими воздействиями, СВЧ-излучениями с целью программированного управления процессами пластической деформации, для получения материалов с высокими служебными характеристиками.

Монография предназначена для научных работников и инженеров, преподавателей, аспирантов, студентов старших курсов, специализирующихся в области физики конденсированного состояния, прочности и пластичности, материаловедения.

УДК 669.2.8:620.178.6

ББК 22.37

ISBN 978-985-477-694-1

© Троицкий О. А., Савенко В. С., Сташенко В. И.,  
Скворцов О. Б., Самуйлов С. Д., Правоторова Е. А., 2019  
© УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	7
ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МЕТАЛЛАХ.....	9
1.1 Основные электрические эффекты.....	9
1.2 Три вида движения свободных электронов в металле.....	14
1.3 Электропластический эффект в металлах.....	15
1.4 Практические применения ЭПЭ и электропластической деформации металлов (ЭПДМ).....	20
ГЛАВА II. АППАРАТУРНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВИБРАЦИЙ И СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОВОДНИКОВ, НАВЕДЕННЫХ ТОКОМ.....	22
2.1 Сопутствующие физические эффекты.....	22
2.2 Измерение вибрации.....	34
2.3 Аппаратурные средства исследования вибрационного отклика на прохождение импульсов тока.....	41
2.3.1 Датчики для измерения вибрации проводников.....	41
2.3.2 Аппаратура формирования импульсного тока и измерения вибрационного отклика.....	43
2.3.3 Эквивалентная схема проводника.....	44
2.4 Результаты испытаний.....	50
2.4.1 Упругие деформации проводника при пропускании импульсного тока.....	63
2.4.2 Динамическое действие тока на образцы без статического нагружения.....	66
2.4.3 Измерения действия тока на плоских деформируемых образцах.....	68
ГЛАВА III. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ.....	82
3.1 Опытные данные по определению механических напряжений, обусловленных электрон-дислокационным взаимодействием.....	82
3.1.1 Релаксация напряжений в условиях действия импульсов тока.....	82
3.1.2. Установка для испытания металлических кристаллов растяжением.....	83
3.1.3 Зависимости эффекта от частоты следования импульсов.....	89



3.1.4 Выводы .....	90
3.2 Испытания кристаллов на ползучесть при одновременном действии током .....	90
3.2.1 Особенности испытаний кристаллов на ползучесть.....	90
3.2.2 Частотная зависимость электропластического эффекта .....	91
3.2.3 Выводы .....	110
3.3 Влияние тока на внутреннее трение в кристаллах .....	110
3.3.1 Методика эксперимента.....	110
3.3.2 Результаты измерений.....	111
3.3.3 Обсуждение результатов .....	113
3.3.4. Выводы .....	
ГЛАВА IV. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.....	113
4.1 Прокатный стан для получения ленты из нержавеющей стали.....	117
4.2 Ротационная электропластическая вытяжка металла .....	123
4.2.1 Общая схема опытов .....	123
4.2.2 Обычная ротационная вытяжка металла.....	124
4.2.3 Электропластическая ротационная вытяжка металла .....	125
4.2.4 Обычная электропластическая вытяжка металла .....	128
4.3 Применение импульсов тока для формирования механических колебаний в металлических образцах	130
4.4 Одновременное действие тепловых и пондеромоторных эффектов.....	131
ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ СЕРИЙ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ВЕЛИЧИНУ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЕФОРМИРОВАНИЮ .....	136
5.1 Методика эксперимента и полученные результаты.....	136
5.2. Обсуждение результатов .....	140
5.3. Выводы .....	143
ГЛАВА VI. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.....	146
6.1 Выбор волны электромагнитного СВЧ-излучения .....	146
6.2 Передача электромагнитного излучения от источника .....	148

6.3	Материалы и методика эксперимента .....	150
6.4	Результаты эксперимента .....	151
6.5	Результаты рентгеноструктурных исследований.....	155
6.6	Исследование микроструктуры.....	159
6.7	Гистограммы .....	160
6.8	Микротвердость.....	161
ГЛАВА VII. ПРИМЕНЕНИЕ ЭРГОДИЧЕСКОЙ		
ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ		
К ИССЛЕДОВАНИЮ ПИНЧ-ЭФФЕКТА ИМПУЛЬСНЫХ		
ТОКОВ.....		
7.1	Основные положения эргодической теории случайных процессов .....	164
7.2	Особенности применения методов эргодической теории при исследовании вибрации, вызванной импульсными токами .....	167
7.3	Статистические исследования параметров вибрации мощного электрического оборудования .....	171
7.4	Использование статистических методов для анализа механического отклика на действие импульсных токов.....	175
7.5	Исследование сложных сигналов вибрационных датчиков статистическими методами.....	180
7.6	Оценка преобразования электрической энергии импульсного тока в механическую энергию .....	185
ГЛАВА VIII. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРО-		
ПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ КОМПАКТИ-		
РОВАНИЯ (БРИКЕТИРОВАНИЯ) МЕТАЛЛИЧЕСКИХ		
ОТХОДОВ.....		
	Введение .....	93
8.1.	Электропластическое компактирование (брикетирование) дисперсных электропроводящих сред.....	193
8.2.	Исследование прочностных характеристик брикетов.....	200
8.3.	Измерение электрического сопротивления и температуры образцов.....	204
8.4.	Исследование качества металла, выплавляемого из брикетов изготовленных из стружки титановых сплавов .....	206
8.5.	Газонасыщение точек сварки при брикетировании титановых сплавов электропластическим методом.....	209
8.6.	К вопросу о механизме формирования прочных контактов при электропластическом компактировании дисперсных металлических сред.....	217

8.7. Использование электропластической технологии брикетирования металлической стружки для изготовления лигатур .....	218
8.8. Электропластическое компактирование – перспективный метод получения пористых материалов.....	225
Выводы .....	228
<b>ГЛАВА IX. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И МОРФОЛОГИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ .....</b>	
9.1. Гистерезисные потери при локально-контактном деформировании металлов .....	232
9.2. Расчёт пондеромоторных факторов в условиях электропластичности. Математическое моделирование процессов электропластической деформации и их графическое изображение в математическом пакете Matlab.....	244

МГТУ им. И.П.Шамшуркина

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электропластический эффект (ЭПЭ) был обнаружен в 1969 году при действии одиночными импульсами тока плотностью  $\sim 10^5 \text{ A/cm}^2$  и длительностью  $\sim 10^{-4}$  сек на деформацию кристаллов цинка растяжением и сжатием. Он проявлялся в скачкообразных удлинениях образцов при прохождении по ним импульса тока без какого-либо существенного теплового эффекта и без тепловой дилатации образцов, поскольку опыты проводились при температуре жидкого азота. Таким образом, было обнаружено неизвестное ранее явление прямого действие электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию металла, не связанное с тепловым действием тока. Возникло предположение, что в основе нового эффекта лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые помимо джоулевого эффекта способны оказывать особое специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическими напряжениями выше предела текучести. Примерно десять лет спустя в 1978 г. новый эффект действия тока был подтвержден американскими учеными, руководимыми профессором Г. Конрадом. При этом использовались примерно такие же плотности тока и длительности одиночных импульсов. Опыты проводились при комнатной температуре на образцах титана диаметром  $\sim 0,3$  мм, что уменьшало влияние пинч-эффекта, но не исключало его полностью. К исследованиям ЭПЭ в 70-е годы прошлого столетия подключились многие ученые, особенно в России и на Украине, а также в Чили и в Израиле. Установлено, что ЭПЭ является объективно существующим явлением. Он фиксируется на всех без исключения металлах, в той или иной степени пластичных и при различных видах нагружения образцов, включая сжатие и более сложные напряженные состояния. ЭПЭ может действовать наряду с джоулевым эффектом (ДЭ) в ставших уже традиционными способах обработки металлов давлением с применением электрического тока, таких как электроконтактный нагрев (ЭКН), а также индукционный нагрев (ИН) токами Фуко, где также используется ДЭ.

Возникло обоснованное предположение и ожидание, что с помощью ЭПЭ можно интенсифицировать технологические процессы обработки металлов давлением, такие, как волочение, прокатка, штамповка, вытяжка и др. В известной мере эти предположения оправдались, но не полностью, что связано, в первую очередь, с трудностями, возникающими при подведении тока высокой плотности в зону деформации металла на современных прокатных и волочильных станах, а также отсутствием промышленных источников импульсного тока, специально предназначенных для этих целей.

Следует отметить, что ЭПЭ менее универсален, чем ДЭ, т. к. в отличие от ДЭ он существует лишь во время пластической деформации материала, т. е. когда металл нагружен выше предела текучести. Вместе с тем он энергетически менее емок, т. к. ток вводится только в зону деформации

металла – непосредственно в зону волочения, в промежуток между валками при прокатке или по периметру вырубке материала при вырубке, а также локально с помощью обоймы с шариками при вытяжке металла и т. д. Например, в случае волочения с током в режиме ЭПЭ затраты энергии небольшие. Введение технологии электропластического волочения (ЭПВ) на современном стане получения проволоки энергетически означает включение одной не очень мощной лампы накаливания в цепь, обеспечивающую электричеством этот стан. При волочении медной проволоки, например, диаметром 0,2–0,3 мм это эквивалентно включению в цепь 100 Вт лампы накаливания. Вместе с тем в силу относительной малости сечений металла в зоне волочения, прокатки и т. д. плотность вводимой электрической мощности при электропластической технологии достаточно высока и достигает значений  $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, что близко к лучевым воздействиям.

К преимуществам электропластической технологии обработки металлов давлением можно отнести также возможность позонного воздействия на материал и позонной интенсификации технологических процессов с получением материала с периодически измененными свойствами, экологическая чистота метода и его экономичность, высокая скорость и эффективность воздействия, возможность комбинирования с джоулевым эффектом с достижением практически любых сопутствующих температур.

К недостаткам и ограничениям новой технологии относятся ограничения по скоростям деформации, т. к., как будет показано далее, скорости деформации материала не должны превышать скорость дрейфа электронов  $V_F \cong \frac{J}{en} \cong 0,5 - 1 \text{ м/с}$  (где  $e$  – заряд электронов и  $n$  – концентрация электронов в единице объема металла). К недостаткам новой технологии относится также невозможность ее применения при волочении и прокатке заготовок больших сечений из-за сложности создания в зоне деформации плотности тока  $10^5$  А/см<sup>2</sup>, при которой реализуется электропластический эффект.

Таким образом, наиболее вероятными областями технологического применения электропластического эффекта являются сверхтонкое, тонкое и среднетонкое волочение проволоки (до диаметра ~ 1 мм), прокатка тонкого листа и ленты, ультразвуковая ковка ленты, тонколистовая вытяжка, штамповка и вырубка тонколистового материала.

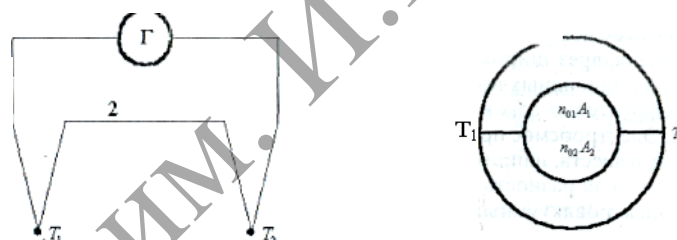
Указанные станы и технологии обеспечивают выпуск самой массовой продукции металлообрабатывающей промышленности. Поэтому использование ЭПЭ во всех видах обработки металлов давлением становится актуальной и важнейшей задачей современной технологии металлургического производства.

# ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МЕТАЛЛАХ

## 1.1. Основные электрические эффекты

Основные электрические эффекты были открыты в начале и середине XIX века. Рассмотрим два термоэлектрических явления – Зеебека и Пельтье.

В 1821 году **Т. Зеебек** обнаружил существование явления, позднее названного термоэлектрическим. Если составить электрическую цепь из нескольких разнородных твердых тел (например, двух (рисунок 1)) и затем места контактов поддерживать при разных температурах  $T_1$  и  $T_2$  то в цепи возникнет электродвижущая сила и электрический ток, фиксируемый гальванометром, который будет течь до тех пор, пока температуры спаев будут различны. Возникновение термоэлектродвижущей силы объясняется нарушением термодинамического равновесия носителей зарядов в местах контакта тел. При перепаде температур вдоль электрической цепи носители заряда (электроны или дырки) начнут диффундировать из более горячей области тела, в которой их концентрация и кинетические энергии имеют большие значения, в область с пониженной температурой, где их концентрация и кинетические энергии меньше. Такое перемещение зарядов приводит к возникновению избытка положительных зарядов в одной точке цепи и избытка отрицательных – в другой точке. Это влечет за собой возникновение внутреннего электрического поля. Возникающая при этом разность потенциалов и будет термоэлектродвижущей силой.



**Рисунок 1. – Термоэлектрическая цепь**

Определим величину возникающей термо-ЭДС. Пусть температуры контактов будут различны:  $T_2 > T_1$ . Тогда, согласно формуле

$$\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_n = -\frac{(A_1 - A_k)}{q_0} + \frac{kT}{q_0} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}},$$

, контактная разность потенциалов

в горячем спае больше, чем в холодном:  $\Delta\varphi_2 > \Delta\varphi_1$ . В результате между спаями возникнет разность потенциалов  $\varphi_{21} = \varepsilon T$

$$\varepsilon_T = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = (T_2 - T_1) \frac{k}{q_0} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} = \alpha(T_2 - T_1),$$

называемая термоэлектродвижущей силой.

Различные значения  $\alpha$  у проводников и полупроводников объясняются следующим. У проводников концентрация носителей зарядов практически не зависит от температуры. У полупроводников этот параметр имеет сильную температурную зависимость, что обуславливает их высокие



термоэлектрические свойства. Знак и величина зависят от механизма проводимости, концентрации носителей и их подвижности. Поэтому, определив знак термо-ЭДС у испытуемых образцов, можно установить механизм их электропроводности.

В 1834 году французский физик **М. Пельтье** обнаружил явление, обратное термоэлектрическому. Если по замкнутой цепи, состоящей из разнородных металлических проводников 1 и 2, пропустить ток от источника, то спаи приобретают различную температуру. Это явление названо эффектом Пельтье. Физическая сущность эффекта Пельтье заключается в следующем: контактные разности потенциалов в спаях «а» и «в» создают контактные электрические поля с напряженностью  $E$  (рисунок 2).

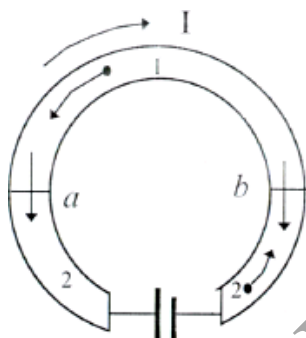


Рисунок 2. – Эффект Пельтье

В соответствии с указанным направлением тока электроны в спае «в» движутся против контактного поля, в спае «а» – по полю. Следовательно, в спае «в» поле ускоряет электроны, кинетическая энергия их возрастает, спай нагревается. В спае «а» поле тормозит электроны, кинетическая энергия их уменьшается. При столкновении с ионами решетки электроны получают от них энергию, понижая внутреннюю энергию спаю. Спай «а» охлаждается. Очевидно, что при изменении направления тока на противоположное нагреваться будет спай «а», а охлаждаться – спай «в», т. к. в спае «а» электроны будут ускоряться, а в спае «в» – тормозиться контактным электрическим полем  $E$ .

Опыт показывает, что теплота Пельтье пропорциональна силе тока и времени его протекания:

$$Q = \Pi It,$$

где  $\Pi$  – коэффициент Пельтье, зависящий от химических свойств материалов.

Наблюдать явление Пельтье можно на опыте, электрическая схема которого представлена на рисунке 3.

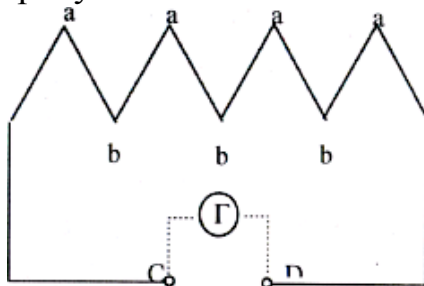


Рисунок 3. – Наблюдение явления Пельтье

Если пропустить ток через термобатарею, все спаи которой находятся первоначально при одинаковой температуре, то после прохождения тока возникнет разность температур между спаями *a* и *b* вследствие эффекта Пельтье. В этом можно убедиться, если выключить источник тока  $\varepsilon$  и включить гальванометр  $\Gamma$  посредством шестиполусного переключателя. Гальванометр обнаружит затухающий ток, направление которого в термобатарее будет противоположно первоначальному.

Опыты показывают, что проводник, по которому течет электрический ток, нагревается. Это объясняется тем, чтодвигающиеся носители заряда испытывают сопротивление со стороны проводника. Ленц и Джоуль экспериментально пришли к выводу: количество теплоты  $Q$ , выделяющейся на участке проводника, прямо пропорционально квадрату силы тока  $I^2$ , сопротивлению проводника  $R$  и времени прохождения тока  $t$ , т. е.  $Q = I^2 Rt$ .

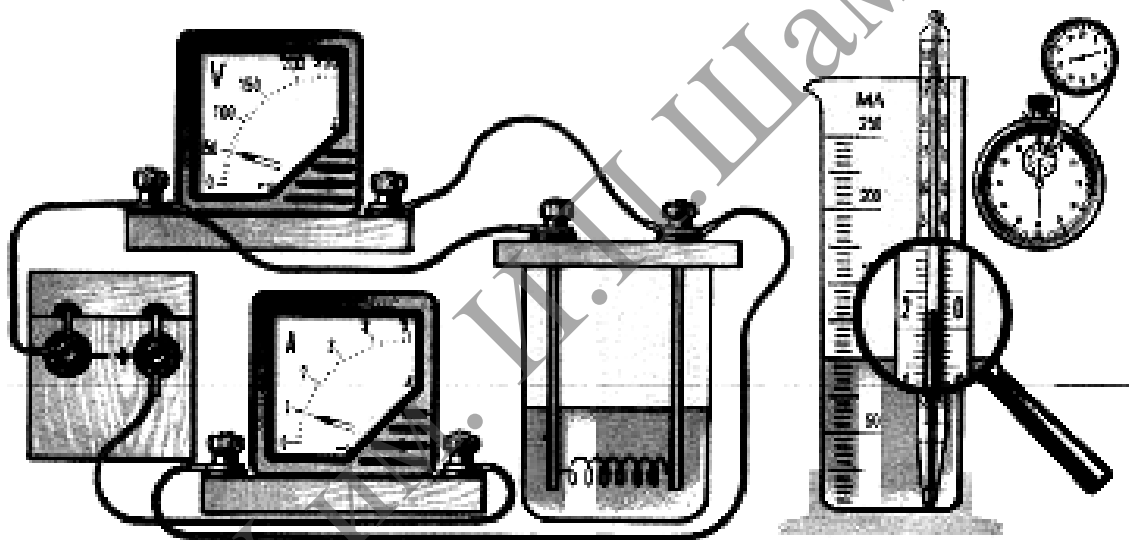


Рисунок 4. – Выделение тепла при прохождении электрического тока на участке электрической цепи с конечным сопротивлением при отсутствии в нем химических превращений

$$Q = A = Uq = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t$$

Все способы электроконтактной обработки (ЭКО) основаны на нагреве металлов теплотой, выделяющейся при протекании электрического тока через контакт. Количество выделяющейся теплоты зависит от силы тока, длительности его протекания и контактного сопротивления, обусловленного состоянием контактирующих поверхностей. Роль электрического сопротивления в процессе контактной обработки существенна.



Рисунок 5. – Выделение или поглощение дополнительной теплоты Томсона в зависимости от направления тока

Томсоном были проведены опыты определяющие выделение и поглощение дополнительной теплоты в зависимости от направления тока. теплота Томсона пропорциональна силе тока, времени и перепаду температур и зависит от направления тока в проводнике:

$$dQ^T = -\tau(\nabla T \cdot \mathbf{j}) dt dV,$$

где  $\tau$  – коэффициент Томсона.

Идея опыта, подтвердившего существование эффекта Толмена-Стюарта и первые качественные результаты были получены в 1913 г. русскими физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. В 1916 году американский физик **Р. Толмен** и шотландский физик **Б. Стюарт** усовершенствовали методику русских ученых и выполнили количественные измерения, неопровержимо доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением свободных электронов. Схема опыта Толмена и Стюарта показана на рисунке 6. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному баллистическому гальванометру Г. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра.

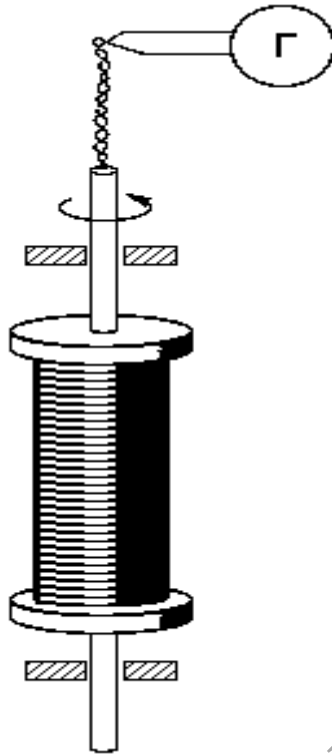


Рисунок 6. – Схема опыта Толмена и Стюарта

При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда  $e$  действует тормозящая сила:

$$F = -m \frac{dv}{dt},$$

которая играет роль сторонней силы. Это сила не электрического происхождения, а инерционного. Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью  $E_{ст}$  поля сторонних инерционных сил:

$$E_{ст} = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

Тем не менее, в цепи при торможении катушки возникает электродвижущая сила  $\mathcal{E}$ , равная

$$\mathcal{E} = E_{ст} l = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt} l,$$

где  $l$  – длина проволоки катушки. За время торможения катушки по цепи протечет уже реальный электрический заряд  $q$ , равный

$$q = \int I dt = \frac{1}{R} \int \mathcal{E} dt = \frac{m}{e} \frac{v_0}{R}.$$

Здесь  $I$  – мгновенное значение силы инерционного тока в катушке,  $R$  – полное сопротивление цепи,  $v_0$  – начальная линейная скорость проволоки на катушке.

Отсюда удельный заряд  $e/m$  свободных носителей тока в металлах, т. е. электронов, равен:

$$\frac{e}{m} = \frac{Iv_0}{Rq}$$

Все величины, входящие в правую часть этого соотношения, можно измерить. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов. Так было надежно установлено, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. По современным данным, модуль заряда электрона (элементарный заряд) равен

$$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

а его удельный заряд равен

$$\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

## 1.2. Три вида движения свободных электронов в металле

В настоящее время считается, что единственными переносчиками электричества являются электроны. Они движутся сквозь кристаллическую решётку. Каждый электрон двигается сам по себе то быстрее, то медленнее, но весь их рой, если к металлу не приложено электрическое напряжение, практически стоит на месте.

Получается, что свободные электроны в металлах представляют собой электронный газ, частицы которого движутся так, как будто положительные ионы кристаллической решетки не создают никакого электрического поля. Согласно теории Друде-Лоренца, электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа. Это позволяет оценить среднюю скорость  $\bar{v}_T$  теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории. При комнатной температуре она оказывается равной примерно  $\bar{v}_T = 105$  м/с.

При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное движение (дрейф), то есть электрический ток. Среднюю скорость  $\bar{v}_D$  дрейфа можно оценить из следующих соображений. За интервал времени  $\Delta t$  через поперечное сечение  $S$  проводника пройдут все электроны,

находившиеся в объеме  $S\bar{v}_D\Delta t$ . Число таких электронов равно  $nS\bar{v}_D\Delta t$ , где  $n$  – средняя концентрация свободных электронов, примерно равная числу атомов в единице объема металлического проводника. Через сечение проводника за время  $\Delta t$  пройдет заряд  $\Delta q = enS\bar{v}_D\Delta t$ . Отсюда следует:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enS\bar{v}_D \quad \text{или} \quad \bar{v}_D = \frac{I}{enS}.$$

Концентрация  $n$  атомов в металлах составляет  $10^{28}$ – $10^{29}$  м<sup>-3</sup>. Оценка по этой формуле для металлического проводника сечением 1 мм<sup>2</sup>, по которому течет ток 10 А, дает для средней скорости  $\bar{v}_D$  упорядоченного движения электронов значение в пределах 0,6–6 мм/с. Таким образом, **средняя скорость  $\bar{v}_D$  упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней скорости  $\bar{v}_T$  их теплового движения  $\bar{v}_D \ll \bar{v}_T$ . Указанная средняя дрейфовая скорость электронов может быть повышена, если возникает импульсный ток с плотностью  $J_m$  до 10<sup>3</sup> А/мм<sup>2</sup> в соответствии с формулой  $\bar{v}_D = \frac{I}{enS}$ , где  $I$  – сила тока и  $S$  – сечение проводника,  $e$  – заряд электрона, равный  $e = 1,60218 \cdot 10^{-18}$  Кл и  $n$  – концентрация свободных электронов в металле, равная 10<sup>28</sup>–10<sup>29</sup> эл/м<sup>-3</sup>. В этом случае дрейфовая скорость повышается на несколько порядков величины, достигая значений 1 м/сек и более.**

Упорядоченное движение электронов или электрический ток в металлическом проводнике возникает при приложении к нему электрического напряжения. При этом ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.

Таким образом, существует три вида движения свободных электронов в металле: беспорядочное движение типа броуновского движения молекул со скоростью примерно  $\bar{v}_T = 10^5$  м/с; упорядоченное движение под влиянием приложенного электрического напряжения с возможной скоростью дрейфа в пределах  $\bar{v}_D = 0,6$ –6 мм/с или примерно 10<sup>-3</sup>–10<sup>-2</sup> м/сек при величине тока 10 А, которая может повышаться, если создается импульсный ток с плотностью  $J_m$  до 10<sup>3</sup> А/мм<sup>2</sup>, достигая значений 1 м/сек.

### 1.3. Электропластический эффект в металлах

Электропластический эффект (ЭПЭ) действия импульсного тока на пластическую деформацию металла был обнаружен в 1968 г. О.А. Троицким [1], который на растягиваемых или сжимаемых в жидком азоте монокристаллах цинка и других металлов в виде скачков пластической



деформации, как показано на рисунке 7. Эффект был подтвержден в работах [2–6] американских ученых на поликристаллическом титане и может быть применен при любом виде обработки металлов давлением (ОМД). Для реализации его должны выполняться следующие условия:

- металл должен находиться в состоянии пластического течения под механическими напряжениями выше предела текучести  $\sigma_c$ ;
- зона деформации металла должна подвергаться действию импульсов тока прямоугольной и трапецидальной формы длительностью примерно  $10^{-4} - 10^{-3}$  сек с амплитудной плотностью тока  $J_m = 10^3 \div 10^4$  А/мм<sup>2</sup>, чтобы электроны проводимости передавали на дислокации и другие подвижные дефекты структуры импульсы силы и энергии достаточной величины для их продвижения и стимулирования пластической деформации металла, с частотой следования импульсов  $F$  в сотни и тысячи Гц, достаточной, чтобы все участки обрабатываемого металла успевали прорабатываться током.

Действие ЭПЭ на ОМД проявляется в следующих технологических эффектах:

- в снижении сопротивления металла деформированию на 25–30 %;
- в увеличении пластичности металла во время ОМД на десятки и сотни процентов, а также в появлении остаточной пластичности на десятки процентов после окончания электропластической деформации;
- в повышении степени совершенства аксиальной текстуры проволоки при волочении, приводящему к снижению ее электрического сопротивления на 15–20 % и к улучшению структуры и фазового состава материала проволоки и прокатного материала (листов и полос);
- при прокатке, волочении и вытяжке нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое  $\gamma-\alpha$  – превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоёмких аустенизирующих отжигов заготовок;
- уменьшается вероятность хрупкого разрушения материала заготовки во время ОМД.

В основе ЭПЭ лежит силовое действие тока на пластическую деформацию металла по двум каналам – через электронную подсистему посредством воздействия «электронного ветра» на дислокации, а также через решеточную подсистему металла посредством создания вибрации решетки за счет пинч-действия импульсного тока (взаимодействия импульсного тока с собственным магнитным полем тока). В силу действия последнего физического фактора возникают колебания узлов решетки, подобные тем, что имеют место при действии ультразвуком на пластическую деформацию металла по механизму своеобразного механотронного действия, не связанного с тепловым действием тока.

Эффект проявлялся, как показано на диаграммах рисунок 7 и рисунок 7а, в скачкообразных падениях приложенной нагрузки испытательной машины Instron за счет скачков пластической деформации

растягиваемых или сжимаемых образцов во время прохождения по ним импульсов тока указанной величины и формы практически без теплового эффекта. Сопровождающие ЭПЭ тепловой эффект в этих опытах был незначительным, порядка одного градуса.

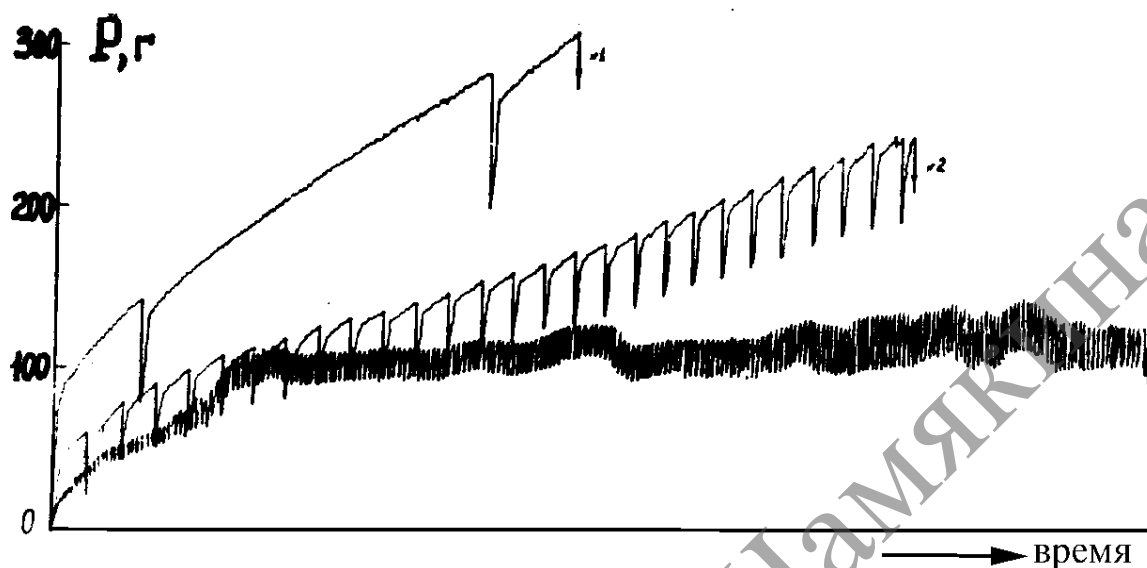


Рисунок 7. – Скачкообразная деформация кристаллов цинка под влиянием импульсов тока; происходит увеличение пластической деформации металла до разрушения при азотной температуре

Увеличение частоты следования импульсов вызывает уменьшение коэффициента упрочнения кристаллов, уменьшение величины одиночных осцилляций и увеличение пластичности кристаллов до разрушения.

На рисунке 7 а приведены диаграммы растяжения чистых и амальгамированных кристаллов цинка с пиками ЭПЭ.

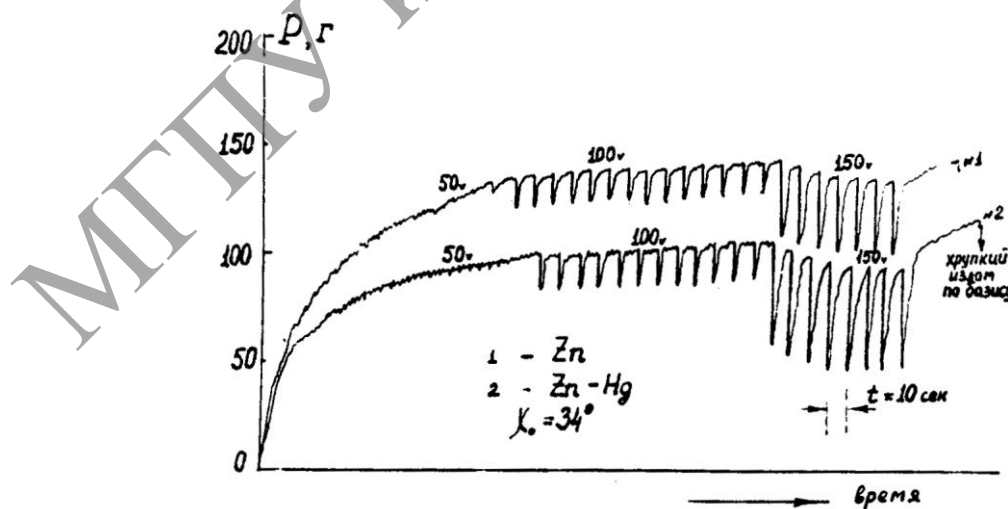
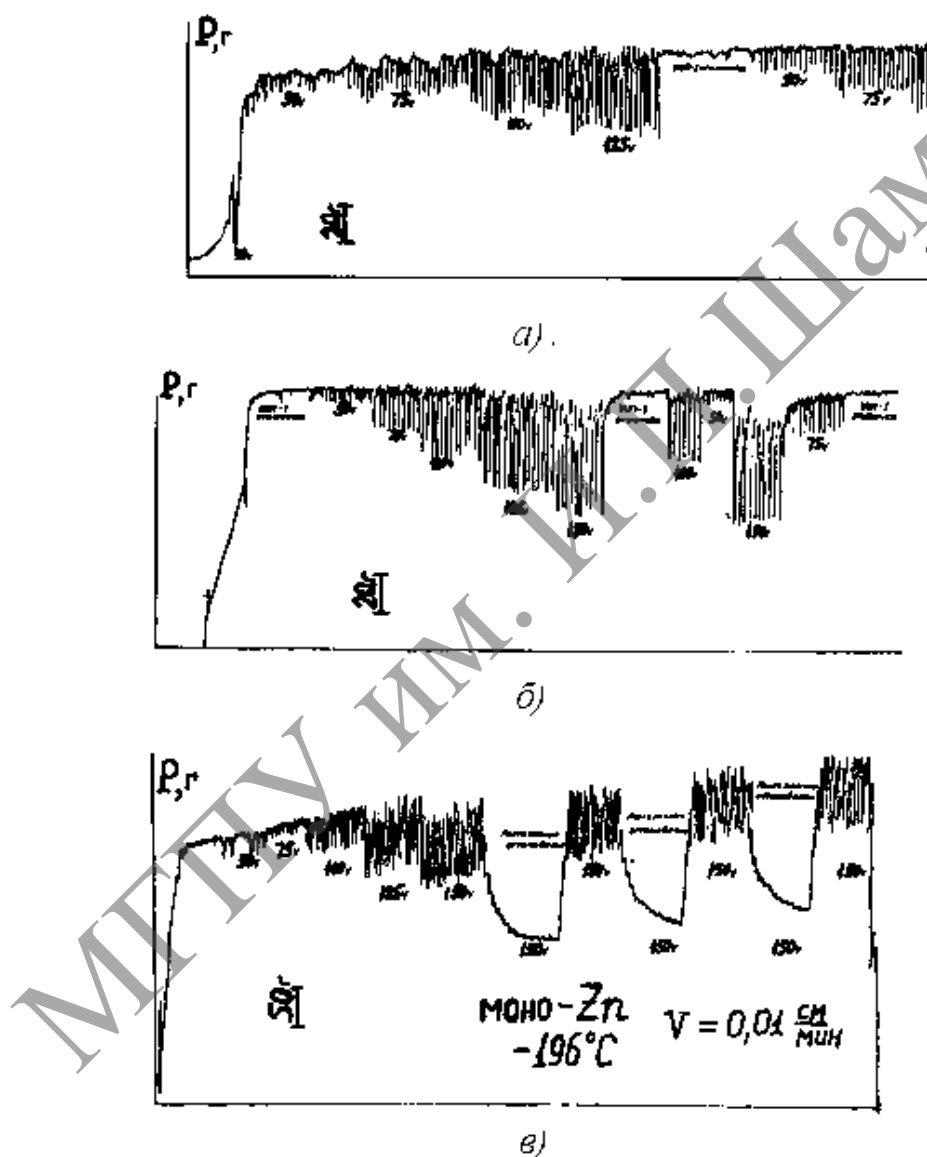


Рисунок 7 а. – Диаграммы растяжения кристаллов цинка ориентаций  $\chi_0 = 34^\circ$  с осцилляциями деформирующего усилия в связи с прохождением импульсов тока при комнатной температуре

Увеличение пиков ЭПЭ в присутствии ПАВ на поверхности образцов (в виде жидкой ртути) при комнатной температуре свидетельствует об облегчении работы выхода дислокаций на поверхность кристаллов в присутствии ПАВ, т. е. об усилении ЭПЭ в присутствии ПАВ.

Важно отметить, что с помощью ЭПЭ, реализованном на импульсном токе, можно управлять пластической деформацией металла. Это подтверждают три представленные ниже на рисунке 8 диаграммы деформации кристаллов цинка, полученные при различных режимах тока и работы испытательной машины в режимах активного деформирования растяжением, а также релаксаций приложенных нагрузок при остановках машины (показано три раза на последней диаграмме).



а) максимум эффекта в области предела текучести и исчезновение эффекта при выключении тока; б) управление пластической деформацией кристалла; в) исчезновение ЭПЭ при остановках деформации кристалла  
Рисунок 8. – Диаграммы электропластического эффекта (ЭПЭ)

Осцилляции деформирующего усилия связаны с прохождением по образцам импульсов тока различной величины (указаны напряжения на клеммах разряжаемых конденсаторов емкостью 780 мкф). Остановка растяжения приводит к вырождению осцилляций в нулевую величину (в). В области упругой деформации эффект практически отсутствует, а в области предела текучести имеет аномально большое значение (а).

Были продолжены детальные исследования электропластического эффекта (ЭПЭ) в металлах с учетом того, что к настоящему времени выявлен ряд новых механизмов действия электромагнитных полей (ЭМП) на деформацию твердых тел (рисунке 9). Установлено существование более десятка различных электрических, магнитных и электронных явлений, что схематично представлено на втором рисунке. Приведены также известные к настоящему времени каналы влияния электромагнитных полей (ЭМП) на механические свойства твердых тел.

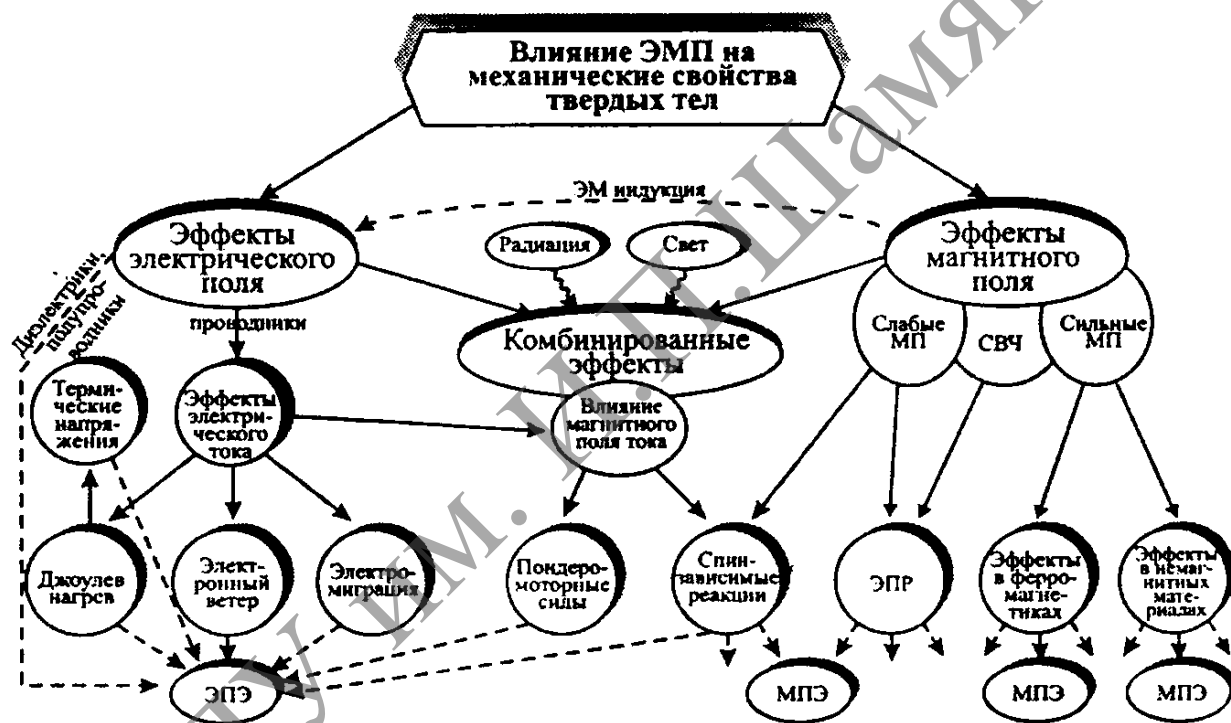


Рисунок 9. – Возможные каналы действия тока и электромагнитных полей

Названия главных явлений, причастных к ЭПЭ, на схеме рисунка 9 затемнены. Это:

- «электронный ветер» [7, 8];
- пондеромоторные силы [9];
- спин-зависимые реакции [10, 11];

Остальные два явления левой стороны схемы (джоулевый нагрев и электромиграция) в отношении ЭПЭ были несущественны по условиям постановки экспериментов. ЭПЭ был подтвержден также другими авторами на различных металлах и сплавах. Важно отметить, что была установлена

полярность ЭПЭ [7, 8], что указывало на наличие в составе этого кооперативного явления действия «электронного ветра», которое по току должно быть линейным, а не квадратичным, например, как пинч-эффект [9] или джоулевый эффект. Существование ЭПЭ было подтверждено американскими учеными под руководством проф Г. Конрада [2–4] на поликристаллическом титане десять лет спустя после нашей первой публикации. Подробную информацию об ЭПЭ и его технологических применениях можно найти в настоящей монографии, а также в публикациях [5, 6].

#### 1.4. Практические применения ЭПЭ и электропластической деформации металлов (ЭПДМ)

В настоящее время на основе ЭПЭ в разных странах (в основном в России, Южной Корее, Италии, Великобритании и Китае) созданы примерно 45 единиц станков и мощных металлообрабатывающих станков, работающих по технологиям ЭПДМ (на рисунке 10). Разрабатываются различные варианты эффективных энергосберегающих критических технологий ЭПДМ прокаткой, волочением, штамповкой, вытяжкой и плющением, а также брикетирования с током металлических отходов. Создается новое оборудование для ЭПДМ и модернизируется существующее оборудование под технологию ЭПДМ.



Рисунок 9. – Количество единиц металлообрабатывающего оборудования, работающего по технологии ЭПДМ

## Использованная литература:

1. Троицкий, О.А. Электромеханический эффект в металлах / О.А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – № 10. – С. 18–22.
2. Okazaki, K. Электромеханический эффект в металлах / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad // Ser. Met. – 1978. – № 12. – С. 1063.
3. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad. // Ser. Met. – 1979. – № 13. – P. 277.
4. K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad. // Ser. Met. – 1979. – № 13. – P. 473.
5. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы: монография/ Ю.В. Баранов [и др.] – М. : Изд-во МГИУ, 2004. – 843 с.
6. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства): монография / О.А. Троицкий [и др.] – М.: Изд-во АНО ИКИ (Москва – Ижевск), 2004. – Т. I. – 563 с. – Т. II. – 467 с.
7. Структура и свойства перспективных металлических материалов / А.Я. Багаутдинов [и др.] – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 575 с.
8. Зуев, Л.Б. [и др.] // ДАН СССР. – 1978. – Т. 239, № 1. – 84 с.
9. Троицкий, О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом / О.А. Троицкий // Известия АН СССР, сер. Металлы. – 1977. – № 6. – С. 118–122.
10. Molotski, M. Influence of static and alternative magnetic fields on plasticity of crystals / M. Molotski, V. Fleurov // J. Phys. Chem. – 2000. – V. B104, № 16. – P.3812–3816.
11. Molotskii, M. // Philosophical Magazine. – 2003. – V. 83, № 12. – P. 1421.



## ГЛАВА II. АППАРАТУРНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВИБРАЦИЙ И СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОВОДНИКОВ, НАВЕДЕННЫХ ТОКОМ

### 2.1. Сопутствующие физические эффекты

Прохождение тока по металлическим проводникам вызывает появление магнитного поля, которое может взаимодействовать с другими проводниками. Изменение магнитного поля вызывает появление индуктивной электродвижущей силы. Постоянное поле между проводниками с током вызывает механическую силу, называемую силой Ампера. Действие этой силы показано на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что два проводника с одинаковыми направлениями тока будут притягиваться и наоборот, если токи в них противоположно направлены, то такие проводники будут отталкиваться.

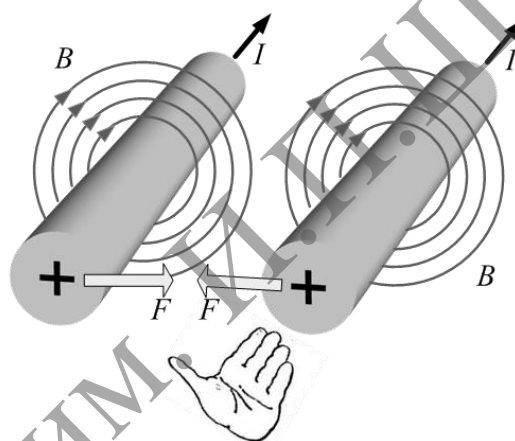


Рисунок 1. – Направление силы Ампера

Сила Ампера, таким образом, это сила взаимодействия двух проводников с током

$$F = B \cdot I \cdot l \quad \text{или} \quad F = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2}{a} \cdot l \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 1,2566370614 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu$  – магнитная проницаемость;

$a$  – расстояние между проводами;

$l$  – протяженность проводников.

Действие магнитного поля проявляется не только между отдельными проводниками с током, но и внутри проводника, когда действует внешнее магнитное поле. Это происходит, например, при возникновении эффекта Холла. Пропускание тока через проводник, который находится в магнитном поле, вызывает формирование зарядов на боковых гранях проводника,

ортогональных направлению магнитного поля и тока, как показано на рисунке 2.

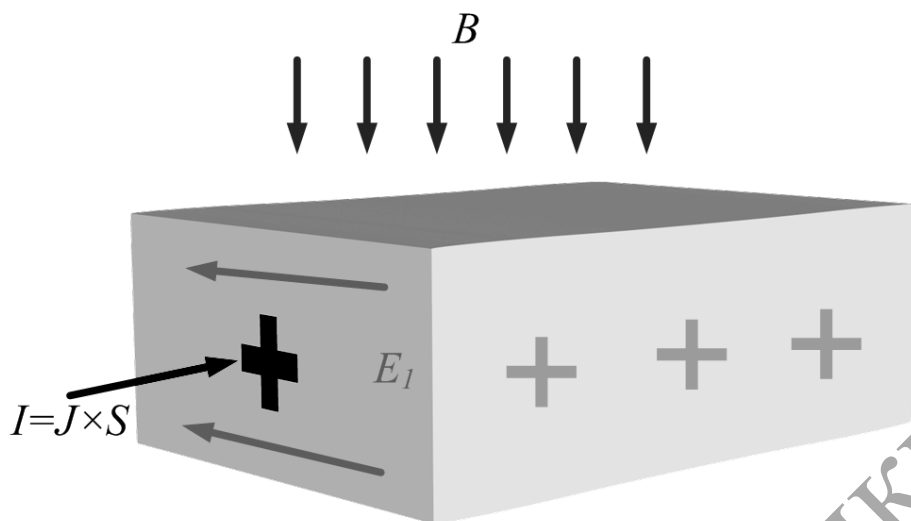


Рисунок 2. – Эффект Холла

Поле Холла определяется по формуле:

$$E_1 = R_H \cdot J \cdot B = \frac{1}{n \cdot e} \cdot J \cdot B \quad (2)$$

где  $R_H$  – коэффициент Холла;  
 $e$  – заряд электрона ( $1,6021892 \cdot 10^{-19}$  Кл);  
 $n$  – концентрация носителей;  
 $J$  – плотность тока;  
 $B$  – магнитная индукция.

Эффект Холла находит широкое применение в измерительной технике для бесконтактного измерения тока, протекающего через проводник, как показано на рисунке 3. Магнитное поле тока в проводнике концентрируется с помощью магнитопровода из ферромагнетика, располагаемого вокруг проводника, и воздействует на элемент Холла, установленный в разрезе магнитопровода. Такая конструкция может быть использована и для контроля величины магнитного поля проводника. В более общем случае при движении электрического заряда  $q$  со скоростью  $v$  в электрическом поле  $E$  и магнитном поле с индукцией  $B$  на заряд действует сила Лоренца, определяемая как:

$$\vec{F}_{\text{ЛОРЕНЦА}} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

При этом следует учитывать, что все величины, кроме  $q$ , в этой формуле векторные.

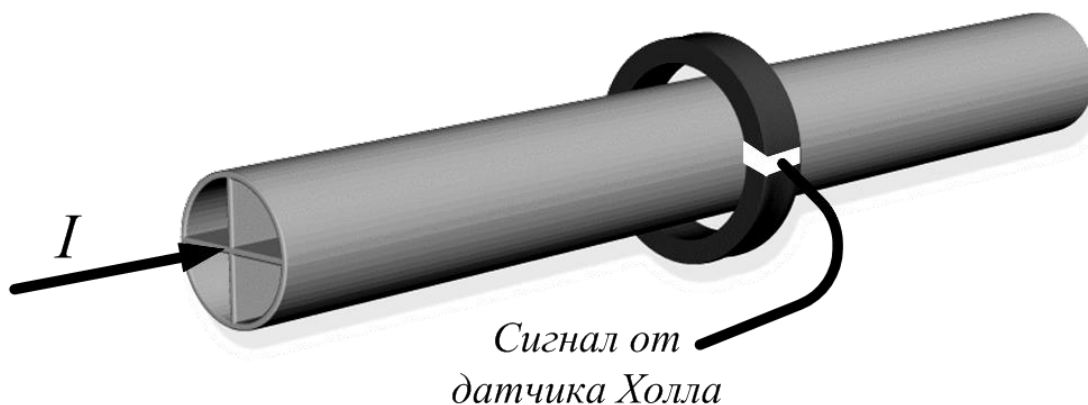


Рисунок 3. – Датчик Холла

Если рассматривать проводник с током в виде группы более тонких проводников, между ними при прохождении тока также будет проявляться сила взаимного притяжения, как показано на рисунке 4 и 5. Действие такой силы, вызывающей радиальное сжатие проводника при пропускании через него тока, называют проявлением пинч-эффекта в металлах. Заметное действие тока достигается при больших величинах этих токов и высокой плотности тока, превышающей несколько кА, или при воздействии на образцы в виде тонкой проволоки. В технике такие большие токи типичны, например, для стержней обмоток мощных генераторов на электростанциях или мощных электродвигателей. Примером таких агрегатов являются агрегаты аккумулирующих гидроэлектростанций.

Эффект равномерного обжатия образцов называют еще имплозией. Поэтому при пинч-эффекте можно говорить об имплозии металлических цилиндрических образцов. При имплозии длинных образцов и ограничении возможности осевого расширения величины внутренних напряжений могут быть весьма значительны и могут вызывать даже изменения свойств материала образца.

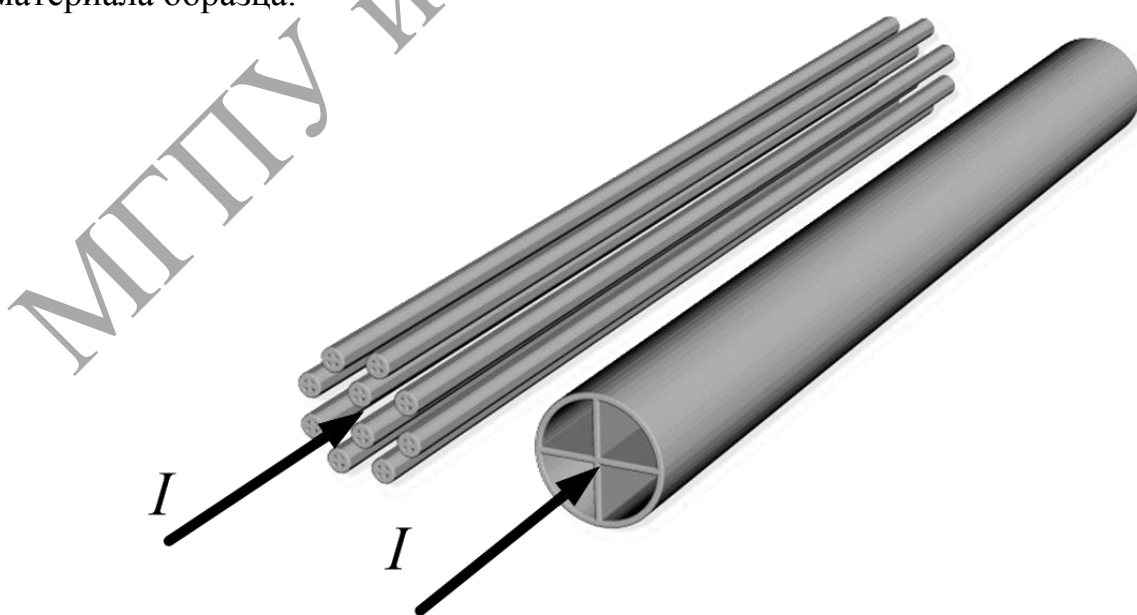


Рисунок 4. – Имплозия образцов

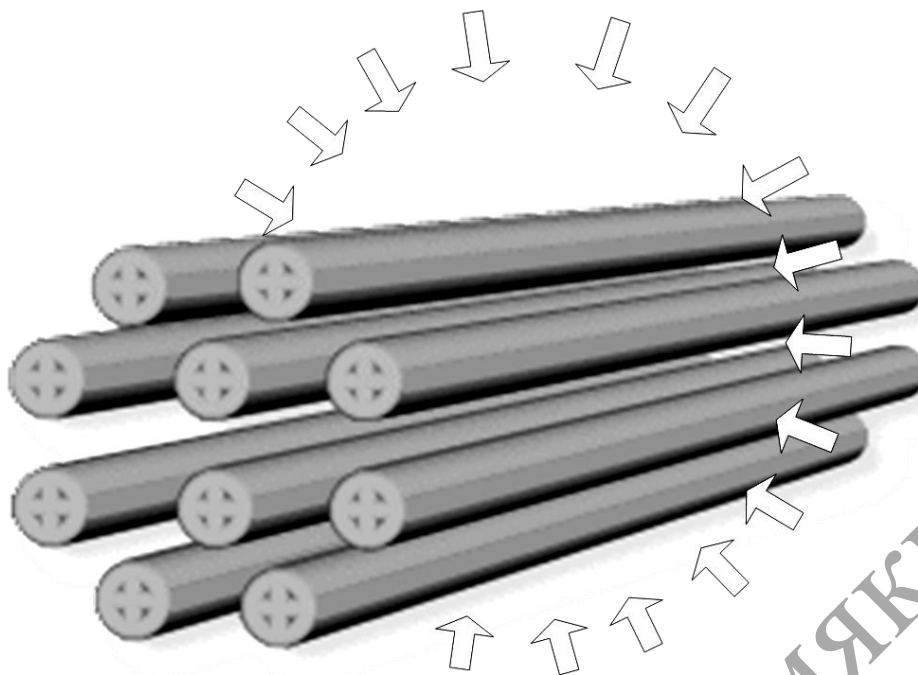


Рисунок 5. – Термический нагрев образцов

Провождение тока через металл вызывает, как известно, его нагрев из-за наличия собственного электрического сопротивления. Оценить количество выделяемой теплоты  $Q$  в единице объема за единицу времени позволяет закон Джоуля-Ленца [1]:

$$Q = \frac{J^2}{\lambda} \quad (4)$$

где  $J$  – плотность тока;  
 $\lambda$  – электропроводимость:

$$\lambda = \frac{n \cdot e^2 \cdot \tau}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

где  $n$  – концентрация носителей;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $\tau$  – инерционное время, характеризующее уменьшение средней скорости носителей с течением времени за счет столкновений с ионами материала;  
 $m$  – масса электрона, равная  $9,109534 \cdot 10^{-31}$  кг;  
 $\rho$  – удельное сопротивление материала.

Выделяемое тепло вызывает рост температуры материала в соответствии с его теплоемкостью, а рост температуры вызывает равномерное расширение материала в соответствии с его коэффициентами линейного и объемного расширения. Температурное действие тока противодействует имплозии, и для снижения его влияния следует по возможности уменьшить время действия тока, используя импульсный ток.

Прохождение импульса тока  $I(t)$  на интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$  сопровождается выделением тепла:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} (I(t))^2 \cdot R \cdot dt \quad (6)$$

где  $R$  – сопротивление образца.

Приведенное соотношение и теплоемкость материала позволяет оценить изменение температуры образца при действии этого вида тока, а при наличии известных коэффициентов линейного и объемного расширения металла оценить температурные изменения геометрических размеров образца.

Изменяющийся импульсный ток через проводник вызывает переменное магнитное поле тока, показанное на рисунке 6 пунктирной линией, а оно, в свою очередь, создает электрическое поле  $E$ , направление которого у поверхности проводника совпадает с направлением тока, а в центре проводника может быть противоположным направлению тока. Поэтому происходит вытеснение тока к поверхности проводника, что получило название скин-эффекта, который широко используется, например, в радиотехнике, где посредством серебрения проводящих элементов добиваются снижения сопротивления поверхностного слоя проводников, что, в свою очередь, позволяет уменьшать омические потери на высоких частотах тока.

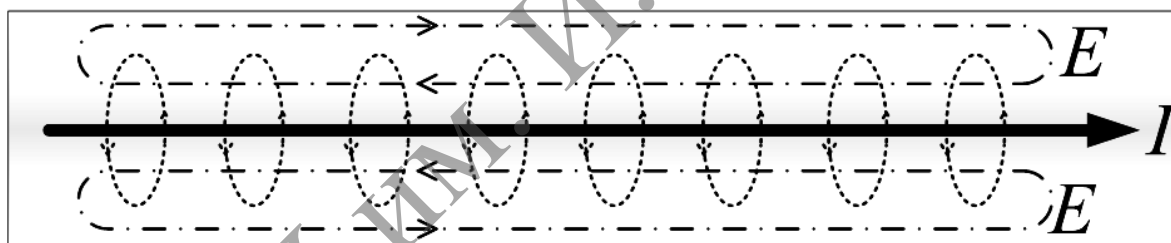


Рисунок 6. – Скин-эффект

Таким образом, при скин-эффекте плотность тока в проводнике снижается от его поверхности к центру. Глубину, на которой плотность тока снижается в  $e$  раз ( $e = 2,81$ ), называют толщиной скин-слоя металла проводника  $\Delta$ . Эту величину можно оценить по формуле:

$$\Delta = c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho}{\mu \cdot \omega}} \quad (7)$$

где  $c$  – скорость света;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость металла (для пара- и диамагнетиков близка к единице);

$\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – частота импульсного тока;

$\rho$  – удельное сопротивление материала проводника.

Прохождение импульсных токов через металлические образцы вызывает также механические колебания образцов [2, 3]. Величина таких воздействий может быть достаточной даже для разрушения испытываемого образца. Механические явления в виде ударов, вибрации и волновых колебаний продольной и поперечной природы могут быть исследованы с использованием известных методов контроля вибрации и ударов [4]. Измерить аппаратурные изменения для образца при прохождении тока удобно с использованием инфракрасных пирометров, которые позволяют оценить температуру бесконтактными методами. Это позволяет исключить температурную инерционность, присущую контактными датчикам вибрации. Прохождение импульса тока сопровождается появлением магнитного поля и связанным с этим деформациями [5–7]. Примером такого пирометра является микросхема MLX90614, обеспечивающая разрешение по температуре до 0,02 °С в диапазоне температур до +380 °С.

Важное значение для понимания поведения проводника при пропускании через него импульса тока имеет проявление эффекта Холла, благодаря которому можно объяснить появление продольных колебаний на основе анализа зависимости коэффициентов Холла от электродинамических процессов [5, 8]. Если в начальный момент переменное магнитное поле заставляет протекать ток в поверхностном слое (скин-эффект), то в последующем, кроме осевой составляющей тока, возникает и радиальная составляющая, которая в магнитном поле вызывает действие сил на носители в перпендикулярном этому направлению, которое будет совпадать с осевым направлением. Это иллюстрируется на рисунке 7. При переходе от начального распределения тока по поверхности из-за скин-эффекта к неравномерному с максимальной плотностью в центре из-за пинч-эффекта происходит перераспределение носителей с концентрацией их в центре и направлением тока к поверхности, что вызывает появление силы Лоренца, действующей на проводник в осевом направлении по направлению тока от внешнего источника, как это происходит в линейных двигателях [9].

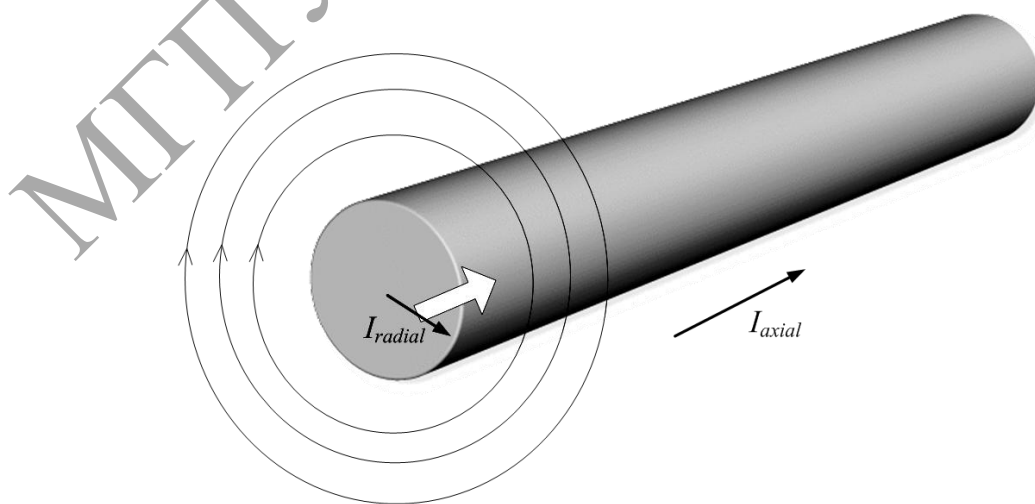
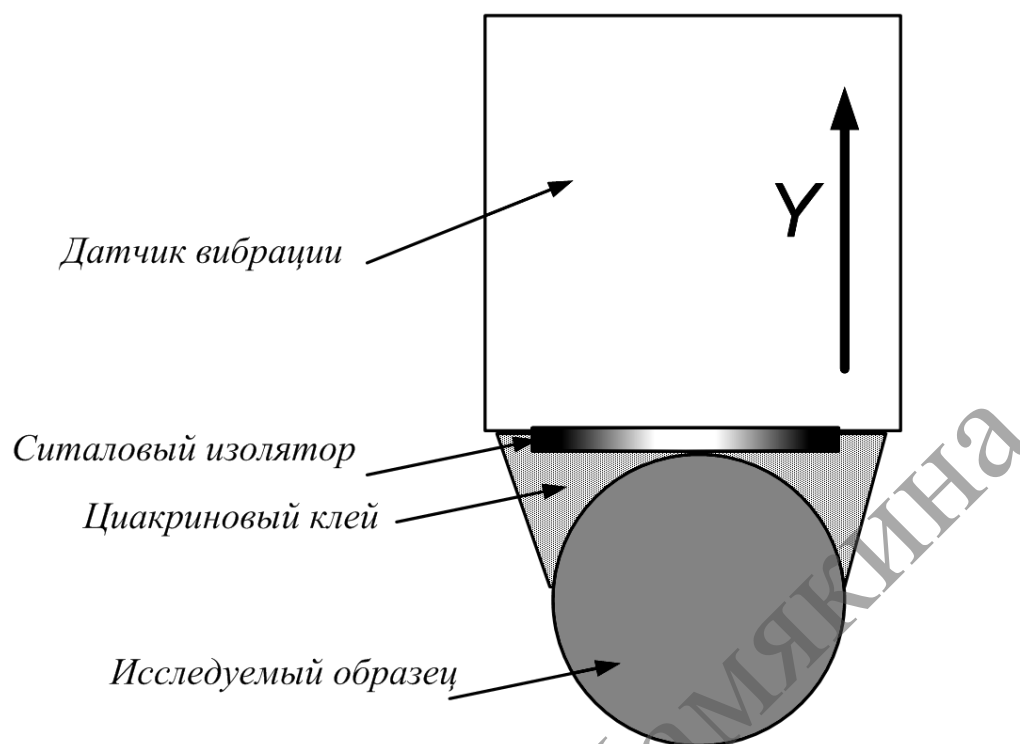


Рисунок 7. – Исследуемый образец





**Рисунок 8. – Датчики вибрации**

Контроль тока через образец целесообразно также выполнять с использованием бесконтактных датчиков. Такие датчики в настоящее время основаны на эффекте Холла и предполагают, что имеется линейная зависимость между током и возбуждаемым магнитным полем. При соответствующей калибровке такой датчик можно использовать и для измерения магнитного поля.

Контроль за величиной тока, в том числе и токов большой величины, проходящего через проводники, является типовой задачей электротехники [10, 11, 12]. В случае импульсного непериодического характера такого тока необходимо оценивать не только его мгновенную амплитуду, но и статистические характеристики, временные параметры импульса, а также обеспечить возможность синхронного контроля других электрических и механических физических процессов, которые сопровождают прохождение таких токов, например, температурные изменения с достаточно высокой точностью. Быстродействующий температурный контроль теплового действия тока может быть обеспечен использованием аналоговых или цифровых пирометров, подключаемых к аппаратуре сбора данных. Примером такого пирометра может служить микросхема MLX90614 [13]. Выходной аналоговый сигнал такой микросхемы, также как и входные сигналы других датчиков физических величин, например, акселерометров, можно непосредственно подать на вход модуля сбора данных. Получение зависимости таких параметров от величины больших импульсных токов требует корректного контроля последних.

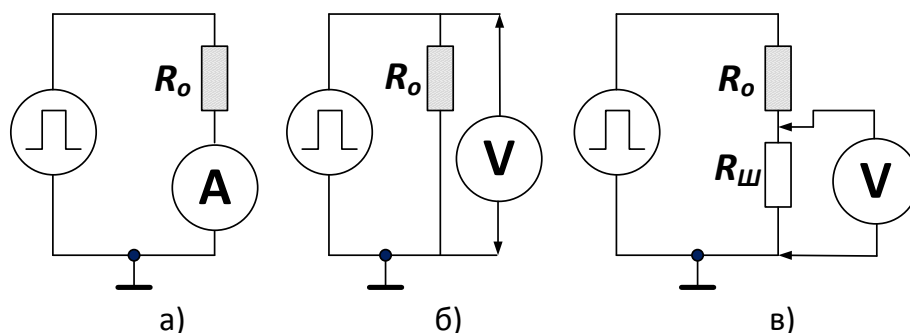


Рисунок 9. – Электрические схемы модуля сбора данных

В простейшем случае величина тока может оцениваться прямым измерением при включении измерителя тока в разрыв цепи (рисунок 10а), по косвенным измерениям напряжения на нагрузочном резисторном элементе  $R_o$  (рисунок 10б) или по измерениям напряжения на шунтирующем элементе  $R_{ш}$ . Основными недостатками таких схем включения является относительно низкая помехозащищенность и возможность повреждения дорогостоящей системы сбора данных через гальванически связанные цепи высоковольтным напряжением от системы формирования больших импульсных токов. Ещё один недостаток связан с влиянием на происходящие процессы и измерения контактных сопротивлений в местах подключения нагрузочного элемента  $R_o$ . Снизить влияние таких сопротивлений можно использованием схемы, показанной на рис. 10а, но более эффективным является применение бесконтактных методов измерения тока через  $R_o$ . В этом случае для контроля тока часто используют воздушный трансформатор тока (пояс Роговского), как показано на рис. 10б. При измерениях с использованием пояса Раговского обычно необходимо выполнить калибровку канала измерения [14].

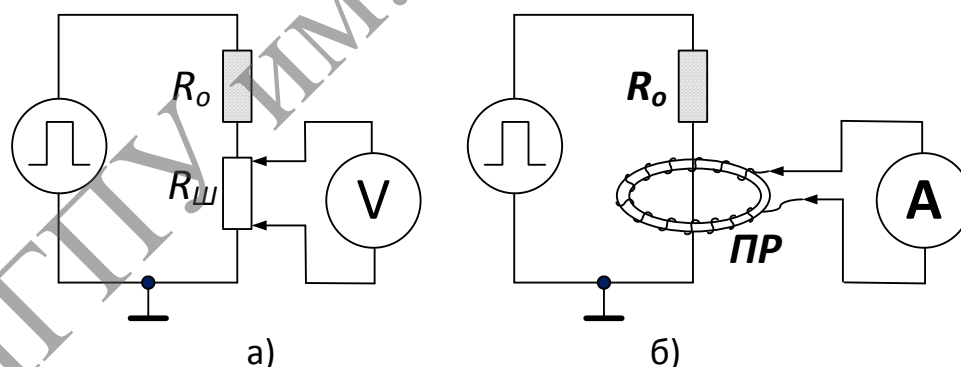


Рисунок 10. – Электрические схемы бесконтактных датчиков

Серийные бесконтактные датчики тока часто выполнены по похожей схеме в виде магнитопровода, охватывающего провод, ток через который контролируют, а непосредственно измерения выполняют с применением датчика Холла, измеряющего магнитную индукцию в магнитопроводе, как показано на рисунке 11а.

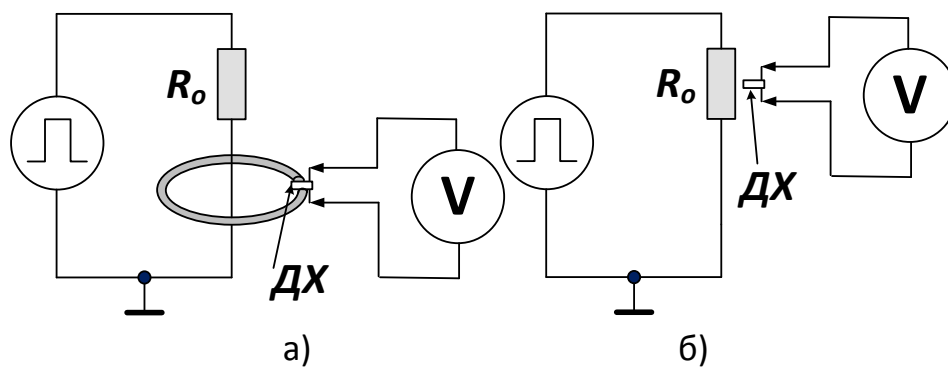


Рисунок 11. – Электрические схемы бес шунтирования тока

Такая измерительная схема обеспечивает измерение тока, исключая влияние шунта, его контактных соединений, позволяет снизить межэлементные сопротивления для материалов с широким разбросом собственных удельных сопротивлений, например, титановых образцов [15, 16].

Измерение параметров импульса:

- Максимальное и минимальное – размах;
- Сумма действия и интеграл;
- Разброс удельных сопротивлений.

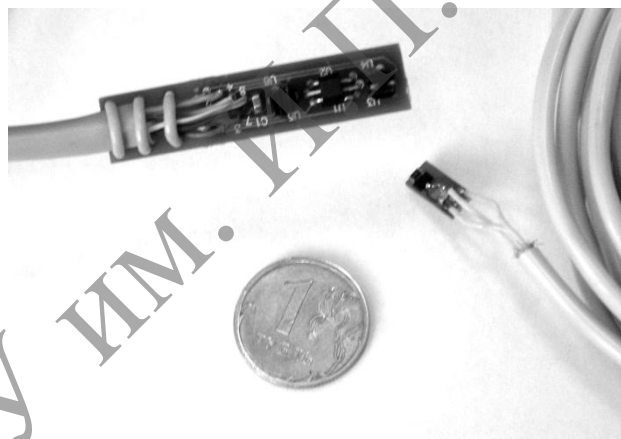


Рисунок 12. – Общий вид измеряемого датчика

Такие измерения могут быть выполнены с использованием стандартных модулей сбора данных и программного обеспечения [17]. На рисунке 13 приведена калибровочная характеристика датчиков Холла для концентрической составляющей магнитного поля. Полученная высокая линейность позволяет использовать такие измерения индукции магнитного поля для оценки мгновенных значений тока через образец.

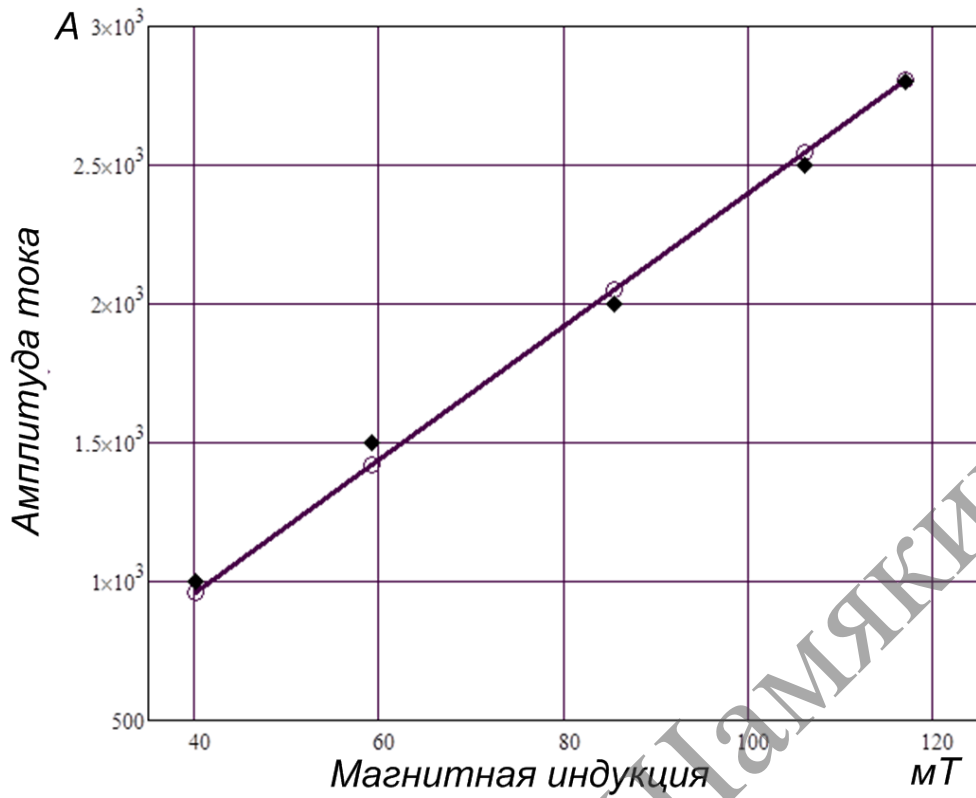


Рисунок 13. – Зависимость амплитуды тока от магнитной индукции

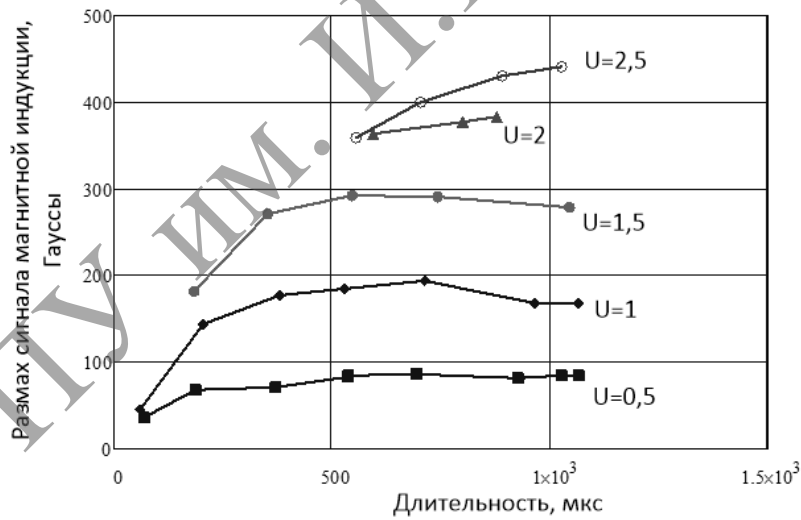
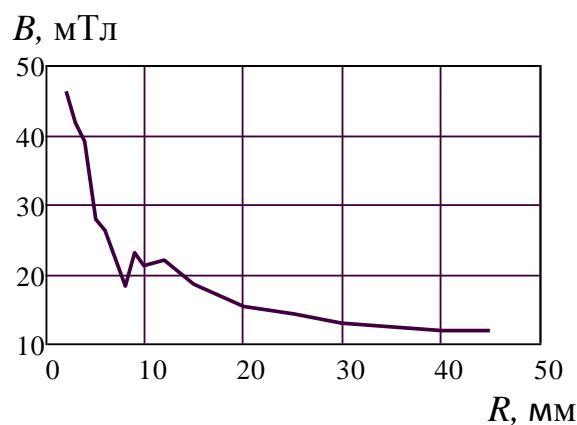
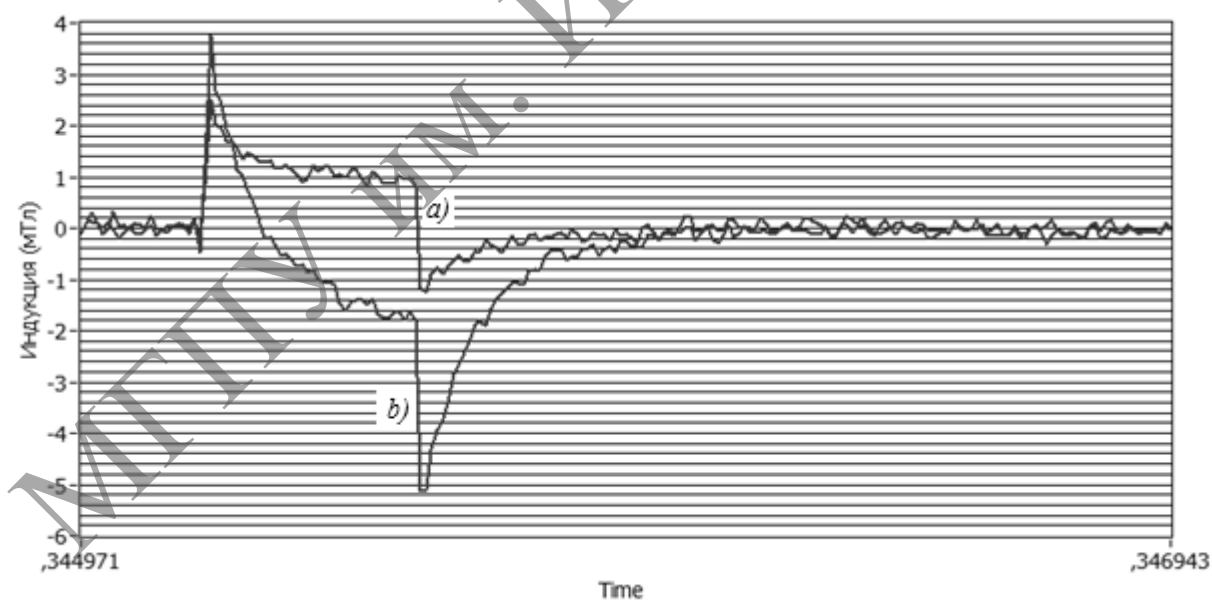


Рисунок 14. – Зависимость размаха измеренной магнитной индукции от длительности импульса при различных значениях амплитуды напряжения импульса, приложенного к образцу. Медная проволока диаметром 3 мм



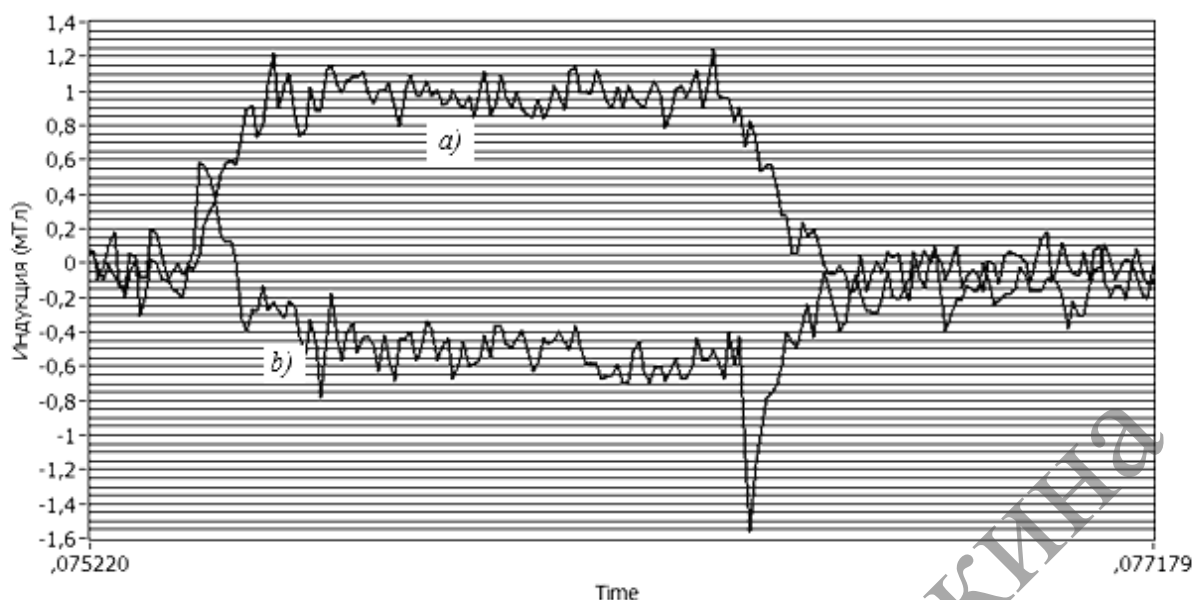
**Рисунок 15. – Зависимость размаха магнитной индукции от расстояния датчика от медной проволоки диаметром 3 мм при амплитуде импульса 2,5 В**

В соответствии с теоретическими соотношениями зависимость близка к гиперболической. Следует отметить, что наличие такой обратно пропорциональной зависимости величины магнитной индукции от расстояния между датчиков и образцом позволяет использовать датчик индукции магнитного поля для контроля даже большого тока через образец, когда поле в образце может достигать несколько Тесла датчиком с относительно небольшим верхним пределом динамического диапазона измерения.



**а) – concentric magnetic field; б) – radial magnetic field**

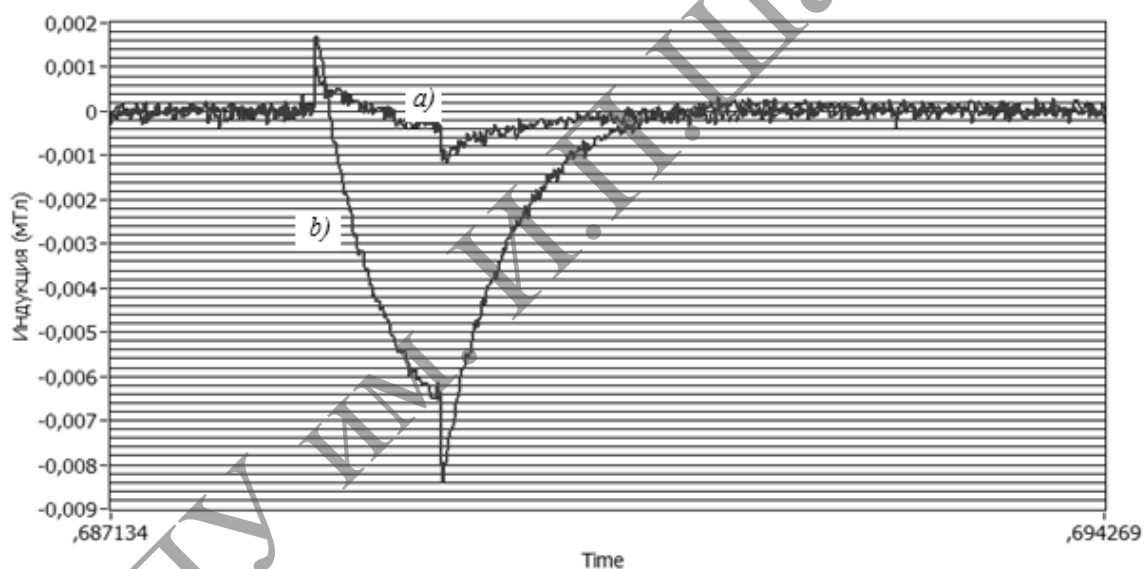
**Рисунок 16. – Образец: титановый стержень сплав ВТ6 диаметром 3 мм, длина 50 мм. Длительность импульса: 381 мкс. Частота затухающих колебаний: 145,6 Гц**



а) – концентрическая составляющая магнитного поля;

б) – радиальная составляющая магнитного поля

Рисунок 17. – Титановая проволока диаметром 2 мм. Длительность импульса 1027 мкс



а) – аксиальное магнитное поле; б) – радиальное магнитное поле

Рисунок 18. – Образец: медный стержень диаметром 3 мм длина 150 мм

Проведение измерений механического отклика на воздействие коротковременно импульса требует учета специфики такого отклика и прежде всего высокой скорости происходящих процессов и высокого уровня помех, связанных с природой электромагнитного воздействия на образец. Учет таких особенностей требует соответствующего выбора аппаратного и программного обеспечения и в некоторых случаях позволяет упростить измерения [18].

Известны различные механизмы возбуждения механических колебаний, в том числе звуковых колебаний при взаимодействии электромагнитных полей с металлами [19]. Такие колебания обычно

характеризуются сравнительно высокими частотами, а в ряде случаев относятся и к диапазону СВЧ. Прохождение мощных импульсов тока через проводники в той или иной степени может сопровождаться проявлением как отдельных, так и совокупности различных эффектов, связанных с проявлением механических колебаний. Виброакустические колебания металлических образцов сравнительно просто зафиксировать и измерить, что позволяет использовать соответствующие виброизмерительные и акустические измерительные приборы для изучения процессов, связанных с прохождением токов высокого уровня через образцы. Ниже рассмотрены некоторые вопросы контроля вибрации в условиях воздействия магнитного поля. Данное направление может иметь и прямое практическое применение, поскольку механические процессы сопровождают работу сильноточных проводников в таких широко применяемых устройствах, как трансформаторы, генераторы и мощные электродвигатели.

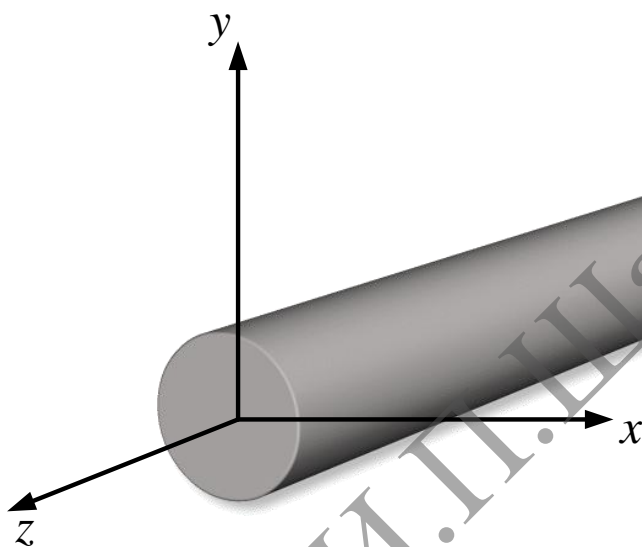
## 2.2. Измерение вибрации

Вопросам измерения вибрации в металлическом оборудовании посвящено большое количество работ [20–22]. Детальный анализ связанных с этим методом и проблем выходит за рамки данной работы. Ниже рассмотрены те аспекты, которые непосредственно касаются применения вибрационных измерений при исследовании пинч-эффекта в металлических образцах.

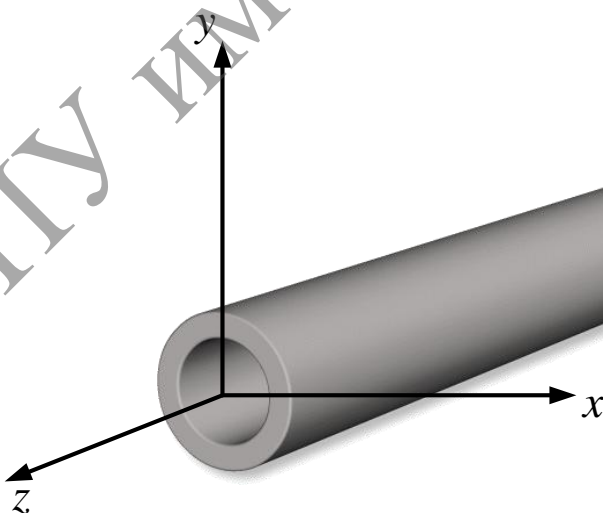
Колебательные процессы в металлических образцах связаны с воздействием на них сил, которые могут вызывать следующие механические процессы: изменение скорости в соответствии со вторым законом Ньютона; упругую деформацию [23–25], связанную с переходом кинетической энергии в потенциальную энергию деформации; пластическую деформацию, связанную с образованием и развитием структурных изменений в материале. При анализе изменений скорости под действием силы обычно предполагается, что контролируемый объект не является абсолютно твердым, т. е. недеформируемым. Поведение такого объекта в пространстве описывается шестью степенями свободы, которые характеризуются шестью координатами, в качестве которых, как правило, выбирают три линейных и три угловых координаты. При исследовании движений образца в виде металлического стержня, через который пропускают импульс тока, угловые перемещения, как правило, относительно невелики и наибольший интерес представляет контроль линейных перемещений. В ортогональной системе координат в качестве таких можно выбрать взаимно перпендикулярные направления  $x$  и  $y$  в плоскости, перпендикулярной оси стержня, и направление  $z$ , совпадающее с осью стержня. Аналогично систему координат можно задать для образцов в виде полого стержня с кольцевым сечением, как показано на рисунке 19. Полые

стержни (рисунок 20) в качестве токопроводящих элементов часто используются при мощных двигателях и генераторах, причем внутренняя полость используется для жидкостного или газового (водородом) охлаждения.

Изменение  $x$ ,  $y$  или  $z$  в результате воздействия тока может быть зафиксировано датчиками перемещения (проксиметрами). Особенностью проксиметров является возможность работы на нулевой частоте, т. е. измерение зазора в статическом состоянии, а также то, что они измеряют относительную величину перемещения, т. е. положение измеряемой точки относительно положения датчика.



**Рисунок 19. – Ортогональная система координат токопроводящего элемента для сплошного стержня**



**Рисунок 20. – Ортогональная система координат токопроводящего элемента для полого стержня**

Исторически измерение перемещений было одним из первых измерений контроля колебаний. В качестве измерительного инструмента обычно применяли индикаторы часового типа с разрешением порядка



10 мкм, и контролируемой величиной при этом был размах перемещения. В настоящее время наряду с такими индикаторами широкое применение получили бесконтактные индуктивные, вихретоковые, емкостные и оптические проксиметры. Такие преобразователи обеспечивают более широкий частотный диапазон и большую точность. Принципиальным ограничением на использование таких типов измерителей при исследовании пинч-эффекта является, с одной стороны, невозможность контроля быстропротекающих процессов, поскольку они не обеспечивают измерение на частотах выше нескольких степеней герц; во-вторых, такие преобразователи зачастую оказываются весьма чувствительны к действию магнитных и электрических полей и, наконец, их погрешности при измерении величин, меньших нескольких микрон, оказываются недостоверными из-за их низкой точности.

Кроме перемещений в качестве контролируемых величин, часто используют скорости и перемещения, которые представляют собой соответственно первую и вторую производные от перемещений по времени:

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (8)$$

и

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt} \quad a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt} \quad a_z = \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{dv_z}{dt} \quad (9)$$

В 70–80 годах прошлого века произошел переход от контроля колебательных процессов по перемещениям к использованию в качестве измеряемого параметра скорости, что было закреплено в целом ряде стандартов. Обоснованию такого перехода посвящена, например, одна из глав в [26]. Важным с точки зрения анализа механических процессов в металлических образцах при пинч-эффекте является вывод о том, что оценка скорости может служить параметром, характеризующим энергию колебательных процессов, а при оценке высокочастотных процессов наиболее информативным служит оценка ускорения, которая может использоваться для оценки сил, действующих на элементы конструкции. В качестве показателя такого силового воздействия в [26] предлагается использовать величину виброперегрузки, определяемую как отношение максимального ускорения  $a_{max}$  к ускорению свободного падения  $g=9,81$  м/сек<sup>2</sup>.

$$k = \frac{a_{MAX}}{g} \quad (10)$$

Следует отметить, что использование скорости как показателя оценки энергии колебаний, подразумевает контроль за этой величиной на некотором временном интервале. В связи с этим в настоящее время наибольшее

распространение получило использование для оценки скорости величины  $v_{СКЗ}$  – среднего квадратического значения этого параметра [27]:

$$v_{СКЗ} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot dt \quad (11)$$

Использование в качестве оценки как для скорости, так и ускорений пиковых значений и величины размаха при этом рекомендуется для случая чисто гармонического колебательного процесса. Для гармонических процессов между среднеквадратическим и пиковым значением существует простое соотношение:

$$a_{MAX} = \sqrt{2} \cdot a_{СКЗ} \quad \text{или} \quad v_{MAX} = \sqrt{2} \cdot v_{СКЗ} \quad (12)$$

При исследовании импульсных процессов, таких, как механический отклик на воздействие импульсов тока, использование средних оценок представляется малоинформативным. Для таких быстропротекающих процессов наиболее удобным измеряемым параметром представляется оценка пикового значения ускорения, которое можно рассматривать как важный параметр, определяющий прочность и надежность конструктивных элементов [28–30].

В настоящее время наибольшее распространение получили в качестве виброизмерительных преобразователей пьезоэлектрические акселерометры. Такие преобразователи механического воздействия обеспечивают преобразование воздействующего на них ускорения в пропорциональный зарядовый сигнал, который преобразуется согласующим преобразователем в сигнал напряжения для последующего анализа. Важным преимуществом таких преобразователей является возможность работы в широком частотном диапазоне при малых габаритах и весе при низком уровне собственных шумов [31]. Это позволяет использовать их для контроля механического отклика на воздействие импульсных токов.

Еще одно преимущество таких преобразователей – широкое распространение многокомпонентных пьезоэлектрических акселерометров, в том числе, трехкомпонентных акселерометров. Поскольку колебательный процесс характеризуется тремя пространственными составляющими, именно такие акселерометры позволяют синхронно во времени оценить колебательный процесс. В этом случае измерение ортогональных составляющих ускорений может быть представлено вектором вибрации [32]:

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

Измерение составляющих позволяет определить мгновенное значение вектора ускорения в пространстве:

$$|a(t)| = \sqrt{(a_x(t))^2 + (a_y(t))^2 + (a_z(t))^2} \quad (14)$$

Кроме колебаний тела без учета деформаций, импульсные воздействия вызывают деформацию в металле, которая может проявляться как в виде поперечных волн сдвига, так и в виде поперечных волн растяжения-сжатия. Такие волновые процессы обычно рассматривают как акустические явления в металлах. Поперечные и продольные волны распространяются с разными скоростями, значения которых приведены для некоторых металлов [33] в таблице 1.

Таблица 1

Материал	Скорость продольных волн в стержне (м/сек)	Скорость поперечных волн (м/сек)
Железо	5170	3230
Сталь углеродистая	5050	3300
Сталь нержавеющая	5150	3092
Медь	3710	2260
Серебро	2640	1590
Золото	2030	1200
Титан	4140	2960
Алюминий	5080	3080
Латунь	3490	2123

Как и для любого волнового процесса со скоростью распространения  $c$  и частотой  $f$  для такой волны, можно оценить длину волны  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (15)$$

В большинстве случаев для частот, на которых проводятся измерения высокочастотным пьезоэлектрическим акселерометром, его габаритные размеры существенно меньше длины волн, что позволяет использовать его для контроля вибрации, связанной с прохождением волн как продольных, так и поперечных.

На рисунке 21 показан трехкомпонентный датчик ускорения, установленный на цилиндрическом образце. На датчике указаны направления измерительных осей. При таком расположении датчика ось  $z$  совпадает по направлению с осью образца, ось  $y$  соответствует радиальному направлению, а ось  $x$  направлена по касательной к боковой поверхности образца.

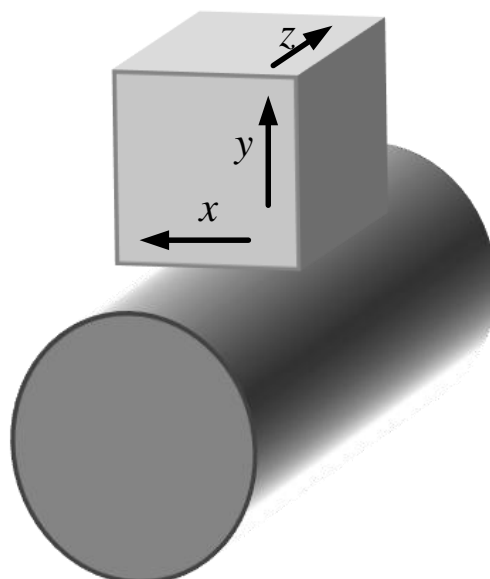


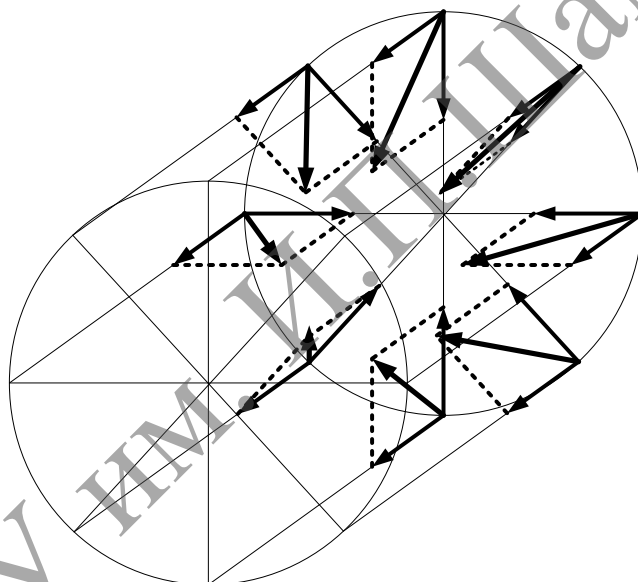
Рисунок 21. – Трехкомпонентный датчик ускорения

Хотя в настоящее время в литературе нет однозначного взгляда на распределение плотности тока по сечению проводника [34–36] и существуют различные варианты от равномерного до колоколообразного, с максимумом, совпадающим с осью проводящего стержня, само явление пинч-эффекта свидетельствует о неравномерном распределении. Неравномерное распределение тока по сечению для быстроменяющегося тока, проявляющегося в скин-эффекте, подтверждено многочисленными опытами и применением этого явления в технике. Изменения тока вызывают вытеснение тока к поверхности проводника, и при импульсном воздействии тока на образец во время нарастания и спада действующего импульса ток распространяется в поверхностном слое образца. При пинч-эффекте для постоянного по величине тока характерно перераспределение тока по плотности в сторону оси образца. Таким образом, импульсное воздействие тока создает перераспределение плотности носителей от равномерного при отсутствии тока к максимальному на поверхности в начале импульса с переходом к максимуму около оси образца. В связи с этим следует отметить возможное наличие неравномерного выделения тепла, связанного с прохождением импульса тока по поперечному сечению проводника во времени. Если в начальный момент ток распространяется по поверхности, то и тепло будет выделяться в поверхностном слое, но затем большая часть тока, а следовательно и тепла будет выделяться в центральной части проводника. Неравномерное распределение выделяемого тепла может вызывать соответствующие динамические деформации, связанные с температурным расширением материала проводника.

Во время действия импульса тока именно центральная часть нагревается сильнее и испытывает наибольшее расширение. Ниже будет показано, что при прохождении импульса тока по радиусу действует ускорение слоев материала, а следовательно появляется сила, обеспечивающая радиальное сжатие

проводника. Деформация, соответствующая равномерному радиальному сжатию металлического стержня или полого цилиндра, рассмотрена в ряде работ [37, 38]. В основу расчетов напряженных состояний цилиндрических или трубчатых образцов положены работы, выполненные Габриелем Ламе.

В целом, наблюдаемые зависимости вибрационного отклика [39, 40] и динамические зависимости распределения тока по профилю сечения проводников как для ранее упомянутых случаев цилиндрического вида, так и для тонкой цилиндрической проволоки [41] не вполне соответствуют результатам теоретического анализа и требуют проведения дальнейших исследований. Хотя измерения выполняются для одной из точек поверхности образца, наличие симметрии относительно оси позволяет предположить наличие аналогичного отклика по всей внешней окружности сечения. Если радиальные составляющие при этом одинаковы, равнодействующая для них будет близка к нулевому значению. Наличие осевой составляющей будет порождать составляющие силы, направленные под углом к оси, как показано на рисунке 22.



**Рисунок 22.** – Деформационные напряжения в проводнике от вибрационного тока

Наряду с наличием осевой силы Лоренца и сжатием радиальной силой, каждый из элементов образца испытывает сжатие в осевом направлении из-за воздействия соседних элементов. Первой причиной является сжатие от теплового расширения соседних элементов образца. Второй причиной является наличие деформации в соответствии с коэффициентом Пуассона, как показано на рисунке 23. В совокупности можно утверждать наличие всестороннего сжатия материала, которое обычно называют имплозией. Наличие нескольких причин искажает реальный деформационный отклик на действие проходящего импульсного тока и, в частности, снижает рост радиальной деформации в зависимости от величины тока относительно «идеальной» квадратичной зависимости.

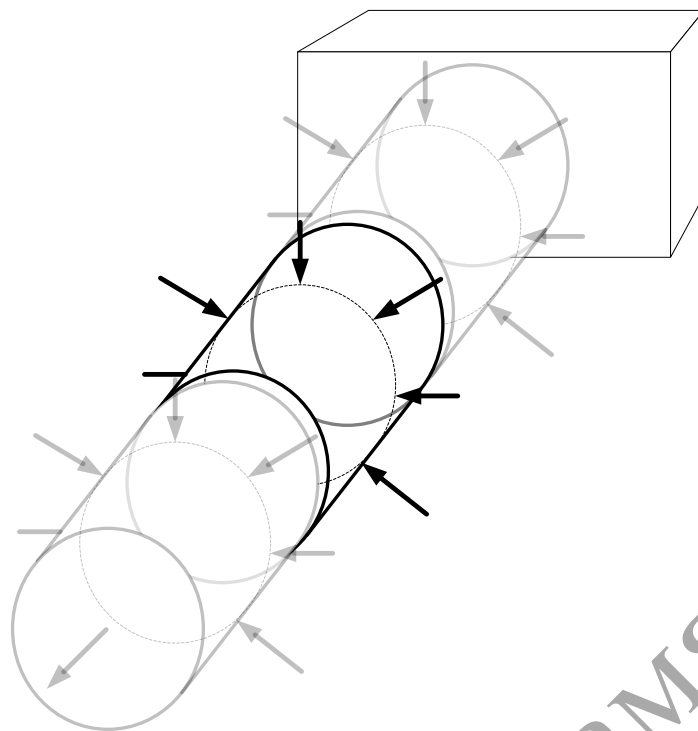


Рисунок 23. – Деформационный отклик образца при прохождении импульсов тока

### 2.3. Аппаратурные средства исследования вибрационного отклика на прохождение импульсов тока

Как показали эксперименты, для контроля вибрационного отклика необходимо использовать виброизмерительные преобразователи с частотным диапазоном в несколько десятков килогерц как минимум, поскольку механические процессы в образце происходят с высокой скоростью. Как уже отмечалось, это также делает практически невозможным применение виброизмерительных преобразователей с непосредственным выходом сигнала по перемещению, поскольку они не обеспечивают как частотного, так и амплитудного диапазона. При этом важно, что реальные перемещения находятся для таких преобразователей ниже уровня собственных шумов и нелинейности характеристик.

#### 2.3.1. Датчики для измерения вибрации проводников

Работа измерительной аппаратуры в условиях воздействия высокого уровня электрических помех создает определенные трудности при проведении измерений. Наиболее высокую помехоустойчивость обеспечивает использование оптических акселерометров, которые передают сигнал вибрации по оптоволоконному кабелю и в силу отсутствия металлических элементов в измерительном элементе практически нечувствительны к магнитному полю [42–45]. Виброизмерительный преобразователь (датчик) ускорения должен иметь малые габариты и вес, чтобы не оказывать существенного влияния на процессы вибрации в испытываемом образце.

Пьезоэлектрические датчики вибрации [46–48] при малых габаритах и весе обеспечивают широкий частотный диапазон и на настоящий момент

представляются более пригодными для контроля вибрационного отклика металлического образца при пропускании импульсов тока.

В таблице 2 приведены сравнительные характеристики некоторых типов датчиков, наиболее близко соответствующих требованиям к датчикам контроля вибрационного отклика при пинч-эффекте.

Таблица 2

Тип датчика		Направления измерения	Максимальное ускорение, g	Частотный диапазон Гц	Шум
оптические	FOSA 3660	X,Y,Z	1	0,5–80	<1 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$
	FOA 200	X,Y	40	10–1000	6 мВ СКЗ (60 mg)
	FAS 106	X	40	20–400	3 мВ СКЗ (30 mg)
	SSA-100	X	10	0–100	100 mg
Пьезо	АП20	X,Y,Z	1000	10–50000	–
	АП22	X,Y,Z	1000	10–80000	–
MEMs	ADXL001	X	70	0–22000	4 $\text{mg}/\sqrt{\text{Гц}}$
IEPE	7131A	X,Y,Z	50	1–10000	400 mg СКЗ
	354C10	X,Y,Z	500	2–8000	1 $\text{mg}/\sqrt{\text{Гц}}$

Сравнение датчиков показывает, что оптические датчики при высокой помехоустойчивости имеют недостаточный частотный диапазон, MEMs датчики при весьма малых габаритах, весе и стоимости в большинстве случаев имеют недостаточный частотный диапазон, а их главный недостаток состоит в том, что работа встроенной в них электроники не рассчитана на работу в сильных магнитных полях, а уровень собственных шумов сравнительно велик. Современные пьезоэлектрические датчики имеют низкий уровень собственного шума, который в основном определяется используемыми с ними согласующими электронными устройствами [49]. Воздействие импульса магнитного поля, связанного с прохождением тока через исследуемый образец, может формировать сигнал помехи на пьезоэлектрическом датчике. Возможны следующие причины формирования сигнала помехи: электрическое поле и соответствующая наводка на соединительный кабель датчика; магнитная наводка за счет магнитной индукции; воздействие магнитного поля на корпус и инерционную массу, имеющуюся в датчике. Использование экранированного соединительного кабеля и немагнитного металлического корпуса датчика (титан), изолированного электрически от исследуемого образца ситалловой прокладкой, обеспечивает удовлетворительную устойчивость по отношению к электрическим помехам. Магнитные наводки, выражающиеся в появлении токов наводки, незначительны, поскольку как сам датчик, так и входное сопротивление измерительной схемы, к которой он подключен, являются высокоомными цепями. Примеры трехкомпонентных датчиков вибрации представлены в [50, 51].

Для оценки паразитных составляющих в сигналах частот используют эквивалент датчика, в котором вместо чувствительного пьезоэлемента использован его емкостной эквивалент [52].

Трехкомпонентный датчик представляет интерес с точки зрения оценки паразитного влияния электрического и/или магнитного полей на сигнал датчика. Использование параллельных кабелей и измерительной массы, идентичной для всех каналов при наличии паразитного сигнала, должно создавать одинаковые или близкие сигналы по всем трем выходам датчика. Используемый трехкомпонентный датчик и соответствующая измерительная схема показывают отсутствие таких составляющих, что говорит о незначительности наводок на соединительные элементы и эффекта притяжения инерционной массы магнитным полем.

### 2.3.2. Аппаратура формирования импульсного тока и измерения вибрационного отклика

При исследовании воздействия импульсов тока на металлические образцы используют схемы, основанные на разряде предварительно заряженных конденсаторов. Такие схемы позволяют получить во время действия импульса большую мощность. Пример схемы показан на рисунке 24.

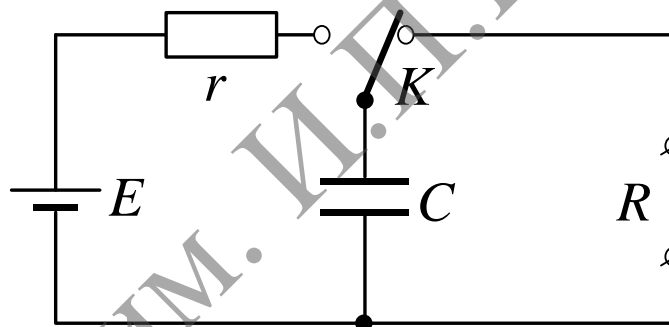


Рисунок 24. – Электрическая схема воздействия импульсов тока на металлические образцы

Конденсатор  $C$  заряжается от источника напряжения  $U$  через ограничивающий резистор  $r$ , и после достижения напряжения ключ  $K$  подключает конденсатор к испытываемому образцу сопротивлением  $R$ . Накопленный заряд  $Q=C \cdot U$ . Время действия импульса тока определяется временем, пока ключ подключает конденсатор к образцу. В процессе разряда напряжение на конденсаторе уменьшается и соответственно снижается ток от величины максимального значения в начальный момент  $I_{max}=U/R$ . Для обеспечения постоянства тока через нагрузку. В качестве ключа может использоваться мощный полупроводниковый транзистор, как показано на рисунке 25.

На данных схемах образец представлен в виде простого проводника, имеющего только активное сопротивление  $R$ . Такое представление корректно только для постоянных или медленно меняющихся напряжений, подводимых к этому проводнику.



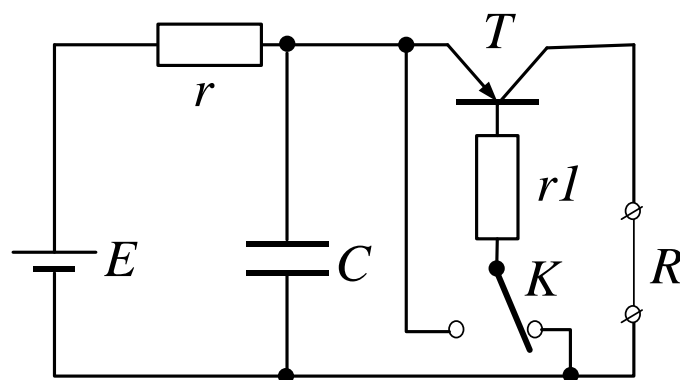


Рисунок 25. – Электрическая схема воздействия импульсов тока на металлический образец в виде простого проводника, имеющего только активное сопротивление  $R$

### 2.3.3. Эквивалентная схема проводника

В области высоких частот прохождение тока через образец определяется скин-эффектом, при котором ток распространяется в поверхностном слое образца, сопротивление которого можно представить как  $R_{\text{скин}}$ . На низкой частоте и на постоянном токе большая часть тока распространяется по центральной части образца, и его сопротивление определяется при высоких уровнях тока соответствующим сопротивлением  $R_{\text{пинч}}$ . В соответствии с этим можно было бы представить эквивалентную электрическую схему образца как показано на рисунке 26.

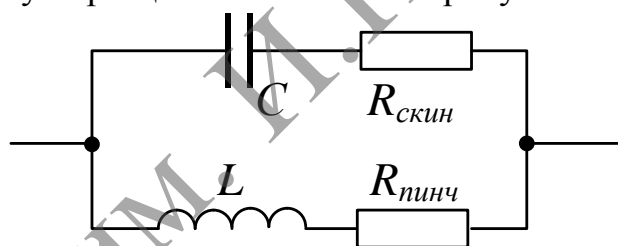


Рисунок 26. – Эквивалентная электрическая схема образца

Соответствующие распределения плотности токов  $J_{\text{скин}}$  и  $J_{\text{пинч}}$  по сечению показаны на рисунке 27.

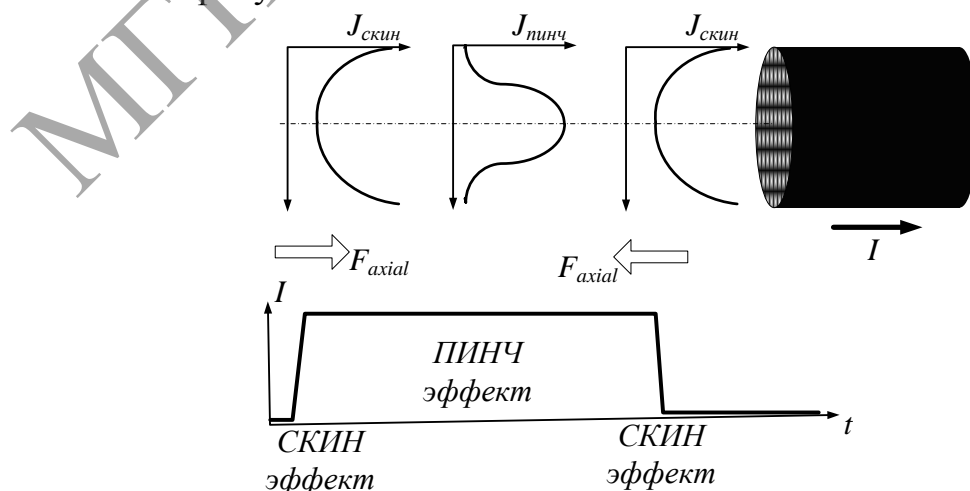


Рисунок 27. – Распределение плотности токов  $J_{\text{скин}}$  и  $J_{\text{пинч}}$  по сечению проводника

Вопросу выбора эквивалентных электрических схем поведения проводников при высоких уровнях токов посвящен ряд публикаций [53–56]. В этих работах, однако, рассматриваются особенности поведения в области высоких частот, где проявляются особенности, связанные со скин-эффектом, и вихретоковые эффекты (токи Фуко). Действие сравнительно длительного импульса тока предполагает, что в моменты появления и окончания импульса, эффекты поверхностного распространения могут быть определяющими, на протяжении импульса тока. Если амплитуда достаточно велика, то могут проявляться эффекты, связанные с перераспределением плотности тока в центральную область проводника. Учитывая высокие уровни токов и проявление нагрева, которое также в указанных крайних случаях неравномерно, эквивалентная схема должна учитывать зависимость сопротивлений от температуры. Таким образом, эквивалентная схема становится нелинейной.

Следует отметить, что переход от высокочастотного отклика к низкочастотному, связанный с перераспределением плотности тока, по сечению проводника может создать условия, при которых при некоторой частоте распространение тока будет по сечению приближаться к равномерному, при котором как нагрев, так и общее сопротивление будут минимальными, т. е. можно минимизировать потери в проводнике при высокой плотности тока выбором частот. Ранее показанная эквивалентная схема с этой точки зрения неудовлетворительна, и предпочтение следует отдать схемам с последовательным соединением конденсаторов и индуктивностей, поскольку на частотах резонанса сопротивление таких соединений минимизируется. Пример такой схемы показан на рисунке 28.

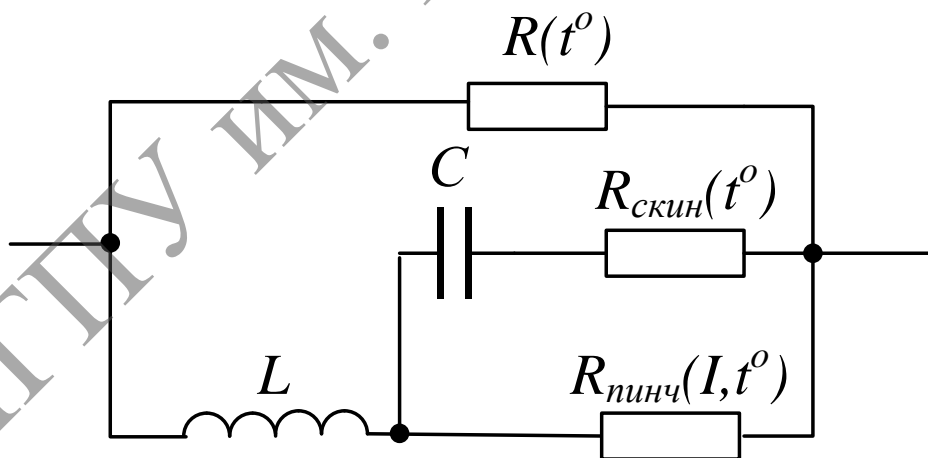


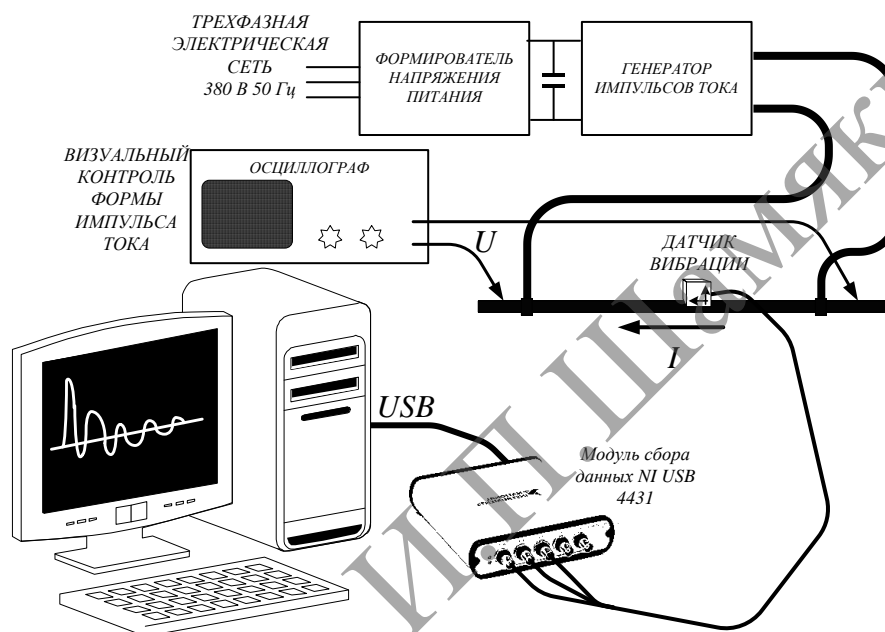
Рисунок 28. – Эквивалентная электрическая схема с последовательным соединением конденсаторов и индуктивностей

Моделирование показывает, что описываемые явления, связанные с минимизацией потерь, происходят на частотах существенно более высоких, чем те, на которых производится передача электроэнергии в линиях передачи переменного тока, но данный эффект может представлять интерес при

подводе высокочастотной энергии к излучателям высокочастотного тока при построении систем беспроводной передачи энергии.

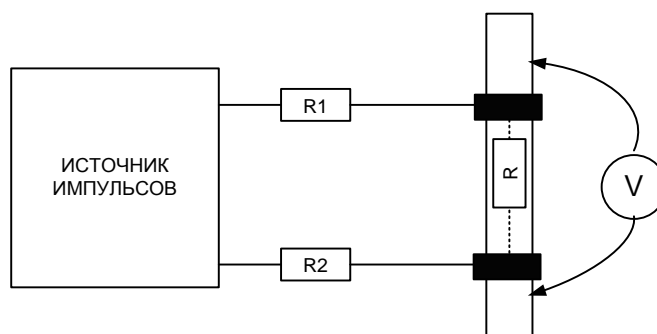
Следует также отметить, что даже без учета эффектов больших токов и температурного влияния эквивалентные электрические схемы кабелей передачи могут быть весьма сложными [57], и построение эквивалентов металлических образцов с учетом всех эффектов требует дальнейших исследований.

На рисунке 29 представлена общая схема установки для исследования вибрационного отклика на воздействие импульсного тока большой величины.



Рисунке 29. – Структура системы для проведения измерений вибрационного отклика на прохождение импульсного тока

Для снижения влияния переходного сопротивления, определяемого сопротивлением контакта питающих проводов в месте подключения проводов питания к испытываемому образцу, измерение напряжения на образце выполняется по четырехточечной схеме, как показано на рисунке 30. В этом случае падение напряжения на контактах не сказывается на результатах измерения напряжения на самом образце.



Рисунке 30. – Четырехточечная схема подключения образца

Кроме параметров датчиков, измерительные возможности в значительной степени определяются модулем сбора данных. В рассматриваемой установке в качестве такого устройства используется USB модуль типа 4431 фирмы National Instruments [58, 59].

При измерении вибрации пьезоэлектрическими датчиками в качестве согласующего устройства обычно используют усилители заряда, схема которого показана на рисунке 31.

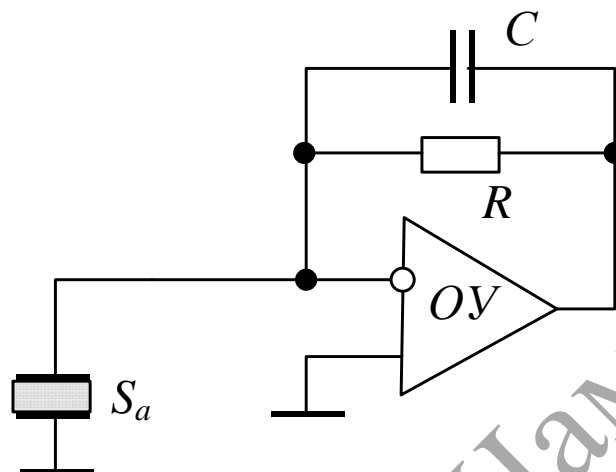


Рисунок 31. – Схема согласующего устройства

Пьезоэлектрический датчик с чувствительностью  $S_a$  при воздействии ускорения  $A$  обеспечивает формирование заряда:

$$Q = A \cdot S_a \quad (16)$$

Усилитель заряда преобразует поступающий на вход заряд  $Q$  в напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{Q}{C} = A \cdot \frac{S_a}{C} \quad (17)$$

Обычно усилитель заряда также содержит резистор  $R$ , обеспечивающий задание режима по постоянному току. Эквивалентная электрическая схема для такого случая показана на рисунке 32.

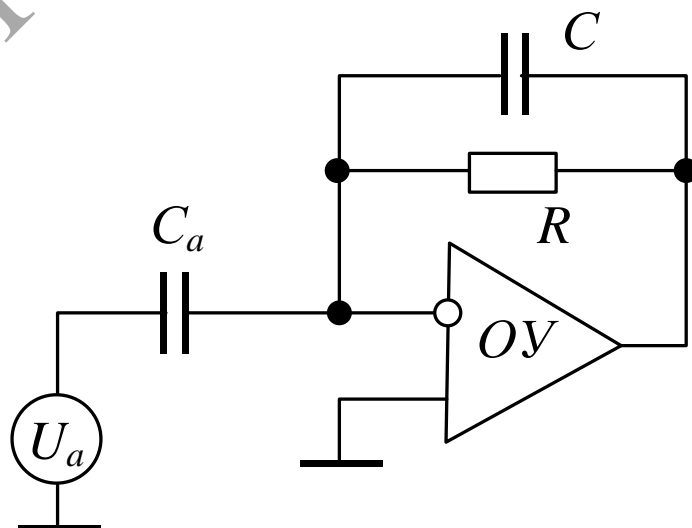


Рисунок 32. – Эквивалентная электрическая схема

Генератор напряжения  $U_a$  и емкость  $C_a$  представляют эквивалент пьезоэлектрического акселерометра.

Модуль сбора данных NI USB 4431 [59] рассчитан на прямое подключение датчиков вибрации с встроенным согласующим усилителем. Поскольку такие датчики имеют сравнительно большие габариты и вес, установка их на образце затруднительна. Пьезоэлектрический датчик АП20 может быть подключен к модулю через дополнительные согласующие усилители заряда, но поскольку исследуемые процессы являются высокочастотными, можно непосредственно подключить датчики к входу модуля. В этом случае вход устройства будет входом по напряжению и при сравнительно низком входном сопротивлении модуля передача низких частот может быть некорректной.

Для многих пьезоэлектрических акселерометров кроме чувствительности по заряду принято указывать и чувствительность по напряжению. Такое подключение можно показать в виде эквивалентной схемы, показанной на рисунке 33. Основное отличие использования входа по напряжению вместо входа по заряду – повышенная чувствительность к емкости кабеля, соединяющего датчик с входом усилителя. Если при проведении измерений кабель и его емкость не изменяется, характеристики измерительных схем близки. Для исключения погрешностей измерения измерительные каналы с пьезоэлектрическими акселерометрами АП20 и модулем сбора 4431 перед измерениями проводилась калибровка с использованием калибратора D9100 фирмы PCB.

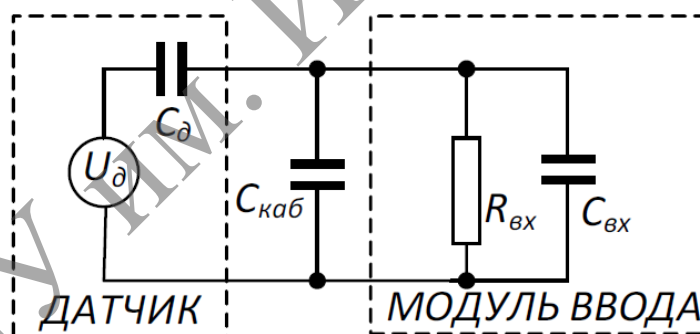


Рисунок 33. – Схема калибратора с датчиком

На рисунке 34 показан калибратор с установленным на нем датчиком АП20. Модуль 4431 обеспечивает параллельный сбор сигналов с датчика и в цифровой форме передает их в компьютер по интерфейсу USB. Обработка сигналов в компьютере выполняется с использованием пакета LabVIEW [60].

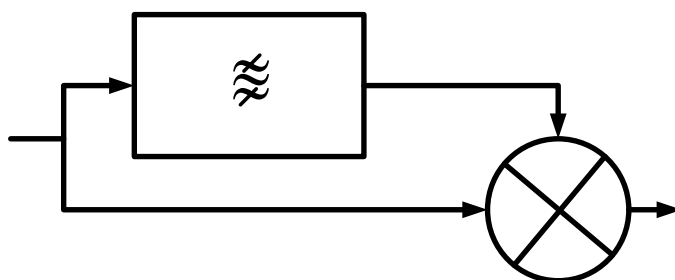
Для компенсации спада в области нижних частот возможна компенсация нелинейности АЧХ в низкочастотной области в соответствии с схемой, показанной на рисунке 35. Для этого входной сигнал суммируется с сигналом с выхода полосового фильтра, коэффициент передачи которого больше единицы на центральной частоте, которая ниже частоты среза входного

усилителя в области низких частот. Такой способ компенсации ухудшает соотношение сигнал/шум в области нижних частот, но широкий динамический диапазон (110 дБ при разрешении 24 бит) используемого модуля сбора данных 4431 позволяет его использовать без заметной потери точности измерений. АЧХ измерительного канала с прямым подключением датчика к входу модуля сбора данных (режим усилителя напряжения [61, 62]) без коррекции и с коррекцией представлены на рисунке 36.

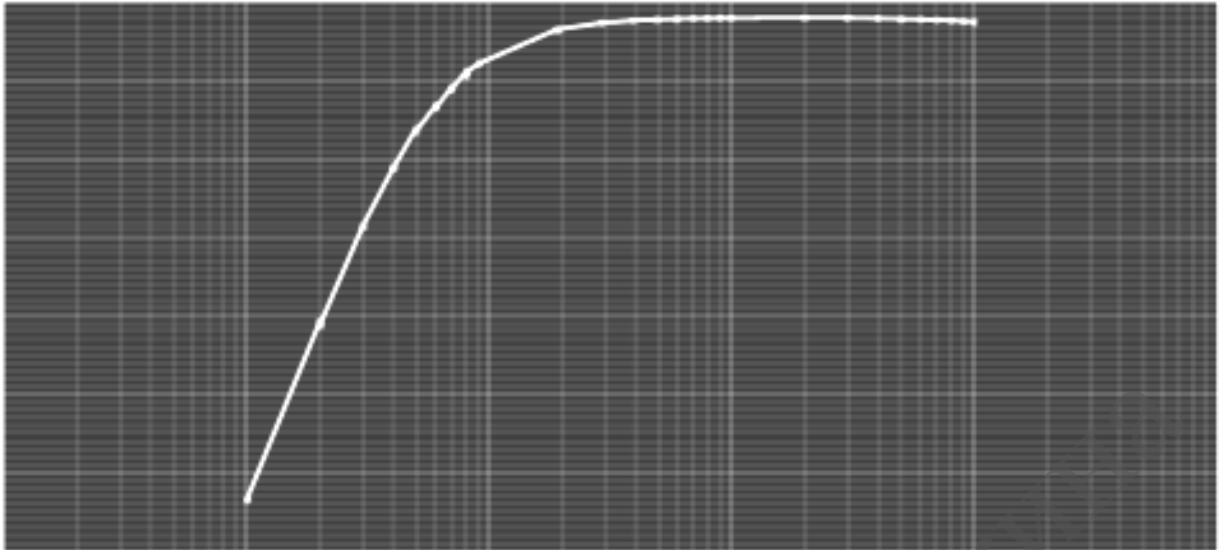


**Рисунок 34. – Общий вид установки**

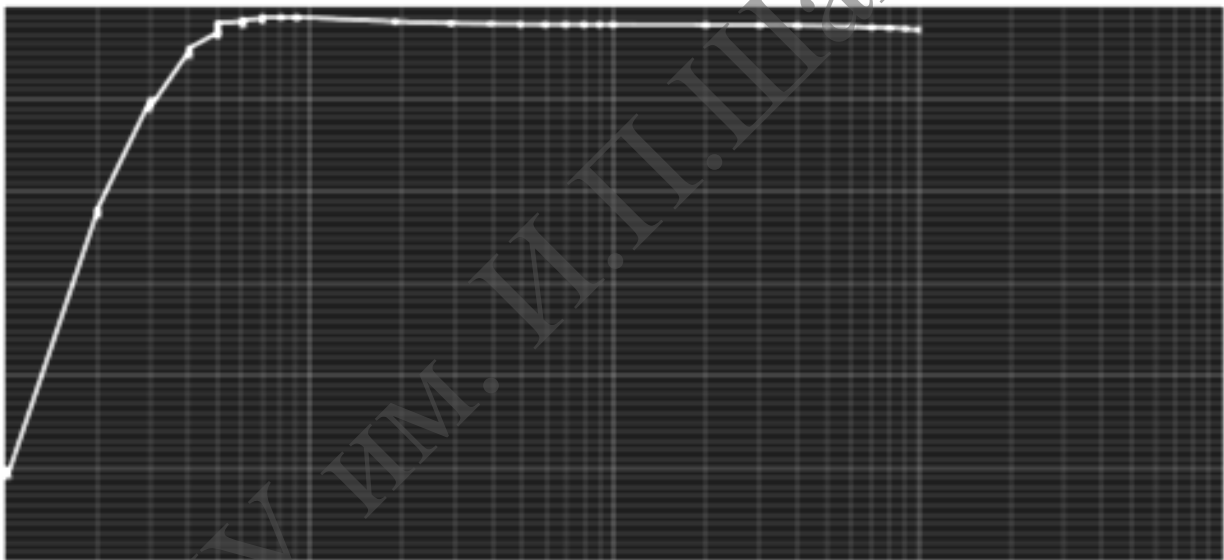
Одновременно с контролем вибрации может проводиться синхронный анализ изменений магнитного поля в непосредственной близости от образца [63].



**Рисунок 35. – Компенсационная схема подключения АЧХ.**



а)



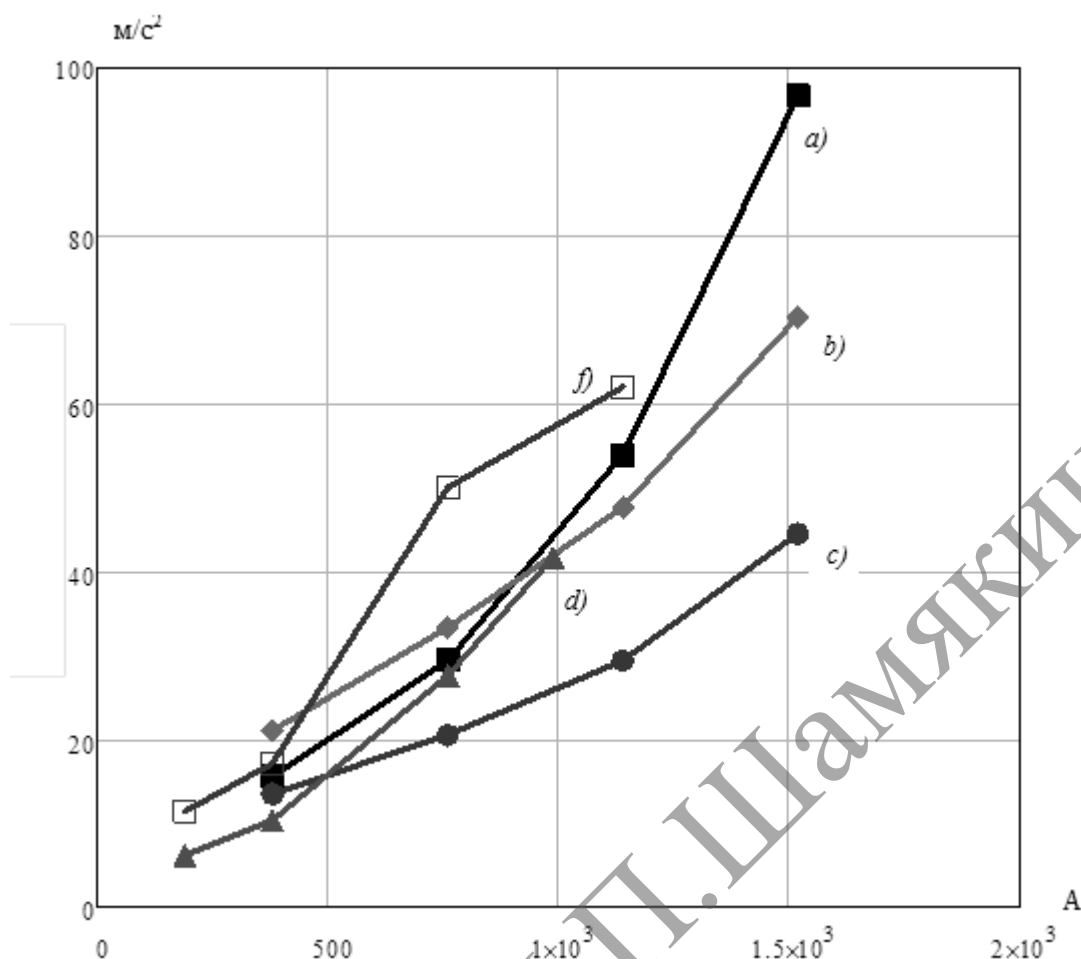
б)

а) без коррекции; б) с коррекцией

Рисунок 36. – Осциллограмма измерительного канала сбора данных

## 2.4 Результаты испытаний

Как показали эксперименты, с ростом тока вибрационный отклик растет быстрее, чем требует линейная зависимость, но менее быстро, чем требует квадратичная зависимость. Предполагалось, что имеется квадратичная зависимость амплитуды вибрационного отклика от величины тока. Типичные результаты представлены на рисунке 37.



a) – 6,0мм; b) – 7,7мм; c) – 11,5мм; d) – 16мм; f) – 22мм;  
 b) внутренним – 5,0 (6,0 9,5 12,8 и 19,8) мм

**Рисунок 37. – Зависимость среднего пикового значения радиального ускорения от величины амплитуды тока на образце для импульса порядка 500 мкс. Медная трубка внешним диаметром**

Имевшийся набор внешних и внутренних диаметров приводит к неравномерно расположенным кривым. Более равномерное расположение соответствует зависимости от плотности тока, как будет показано ниже.

Полученные данные могут быть пересчитаны в оценку возникающих в таком трубчатом образце механических напряжений. Поскольку испытываются образцы, для которых диаметр может быть как меньше, так и больше площадки крепления датчика, а масса датчика сравнительно велика (5 грамм), эти особенности следует учитывать при пересчете. Рисунок 38 показывает основные параметры образца, используемые при расчете. Это часть трубки, на которой имеется крепление ситаллового элемента крепления. Показана только четверть прямоугольной площадки пятна контакта.



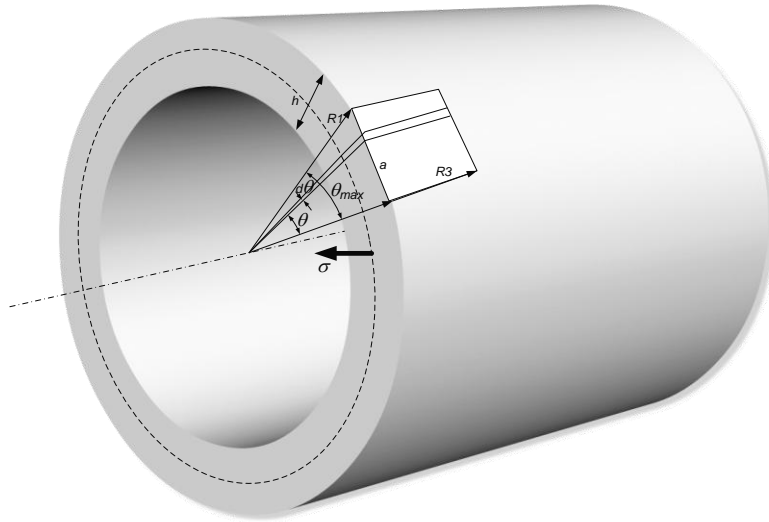


Рисунок 38. – Параметры образца трубки

Исходные данные для расчета:

$D1$  – внешний диаметр трубки,  $R1 = D1/2$ ;

$D2$  – внутренний диаметр трубки,  $R2 = D2/2$ ;

$M_s = 5 \times 10^{-3}$  – масса датчика;

$D3$  – диаметр ситалловой прокладки,  $R3 = D3/2$ ;

$A$  – измеренное ускорение;

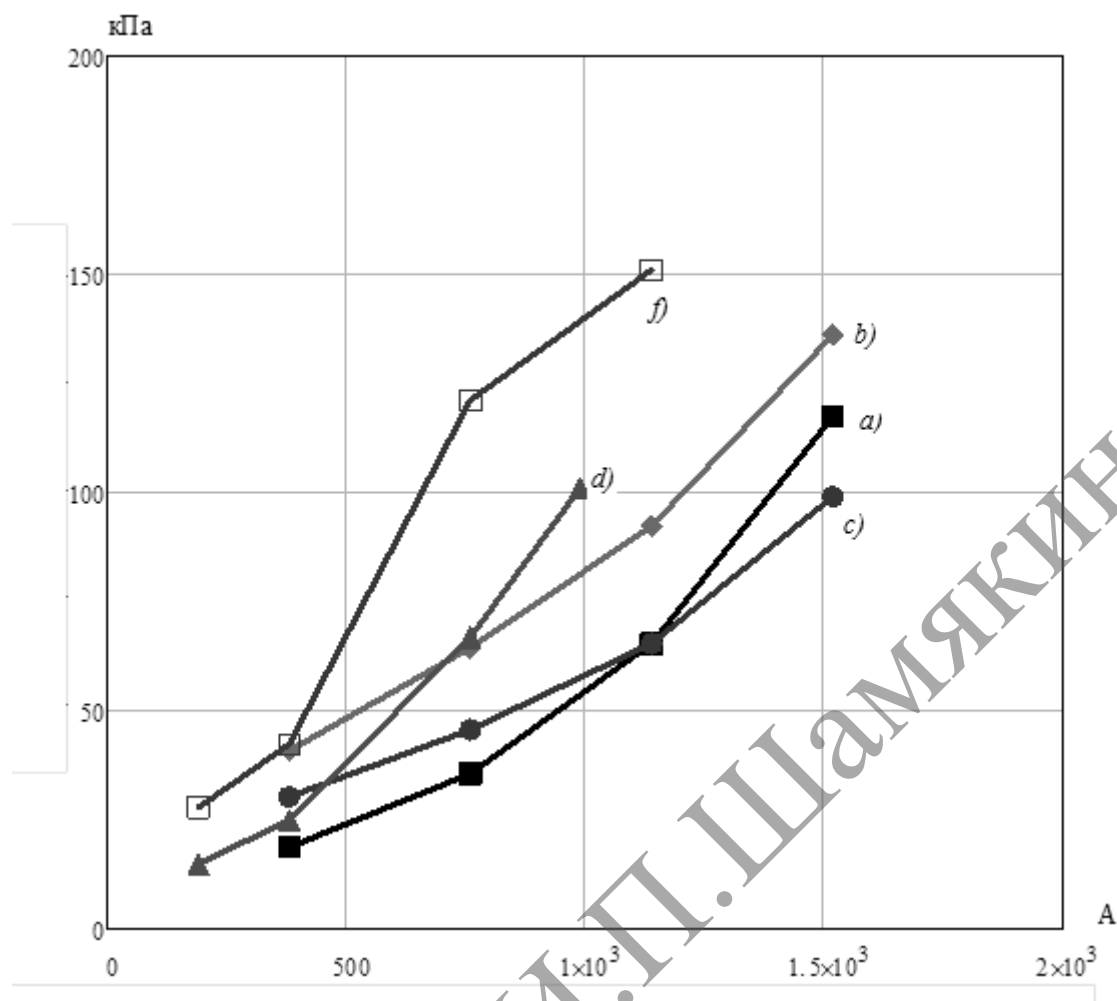
$m$  – удельная плотность материала образца.

$$\sigma = \frac{a_y \cdot (M_s + m \cdot 2 \cdot (R1^2 - R2^2) \theta_{\max})}{4 \cdot R1 \cdot R3 \cdot \sin \theta_{\max}} \quad (18)$$

где

$$\theta_{\max} = \begin{cases} \frac{\pi}{4}, & \text{если } D3 \geq D1 \\ \arctg \frac{D3}{D1}, & \text{если } D3 < D1 \end{cases} \quad (19)$$

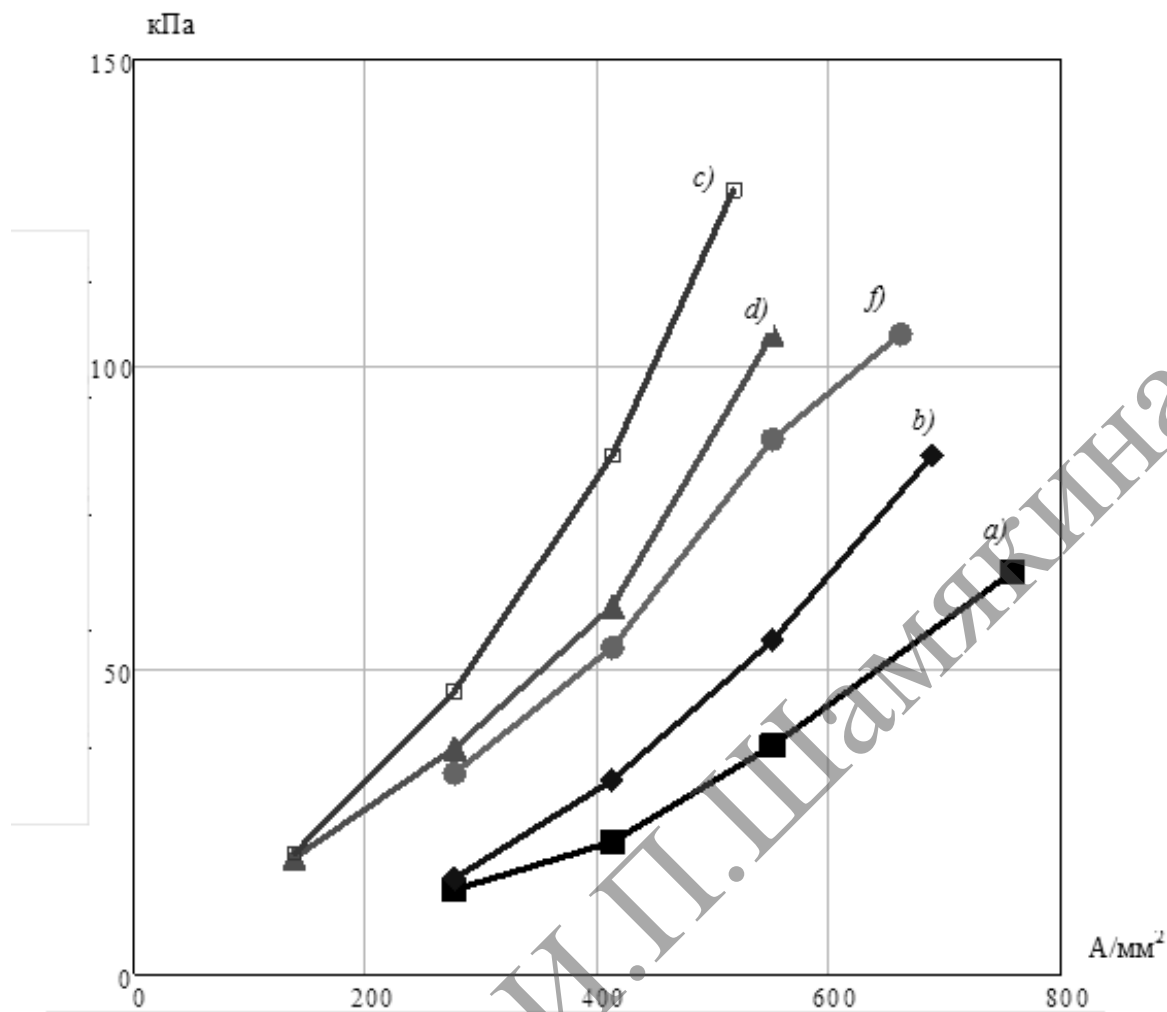
Результаты расчета представлены на рисунке 39.



a) – 6,0мм; b) – 7,7мм; c) – 11,5мм; d) – 16мм; e) – 19,8мм; f) – 22мм; внутренний – 5,0 (6,0 9,5 12,8 и 19,8) мм

**Рисунок 39. – Зависимость среднего пикового значения механического напряжения от величины амплитуды тока на образце для импульса порядка 500 мкс. Медная трубка внешним диаметром**

На рисунке 40 представлены зависимости величины напряжений от плотности тока. При относительно низких плотностях тока механические напряжения не представляют непосредственной угрозы прочности токопроводящих элементов, но, как отмечалось ранее, при больших плотностях тока [64] величина напряжений может приближаться к пределу прочности материала, из которого изготовлены данные элементы даже при малоцикловом воздействии. Учитывая большие сроки эксплуатации и возможные частые смены режимов работы ответственных конструкций, а также тот факт, что при гигацикловой усталости [65–68], значительно снижается порог прочности, что необходимо учитывать.



a) – 6,0мм; b) – 7,7мм; c) – 11,5мм; d) – 16мм; f) – 22мм; внутренним – 5,0 (6,0 9,5 12,8 и 19,8) мм

**Рисунок 40. – Зависимость среднего пикового значения механического напряжения от величины амплитуды плотности тока на образце для импульса 500 мкс. Медная трубка с внешним диаметром**

На рисунке 41, 42 и 43 представлены записи временных сигналов радиального и осевого ускорения, скорости и перемещения. Составляющие измеренные для направления по касательной незначительны и не рассматривались. В качестве меры силового воздействия использовался коэффициент виброперегрузки, который определяется через максимальное значение ускорения  $A_{max}$  [13]:

$$k = \frac{A_{max} [м / сек^2]}{9,8 [м / сек^2]} \quad (20)$$

Даже при низких уровнях плотности тока полученное  $k$  может достигать 5–10, что является значительной величиной.

м/сек<sup>2</sup>

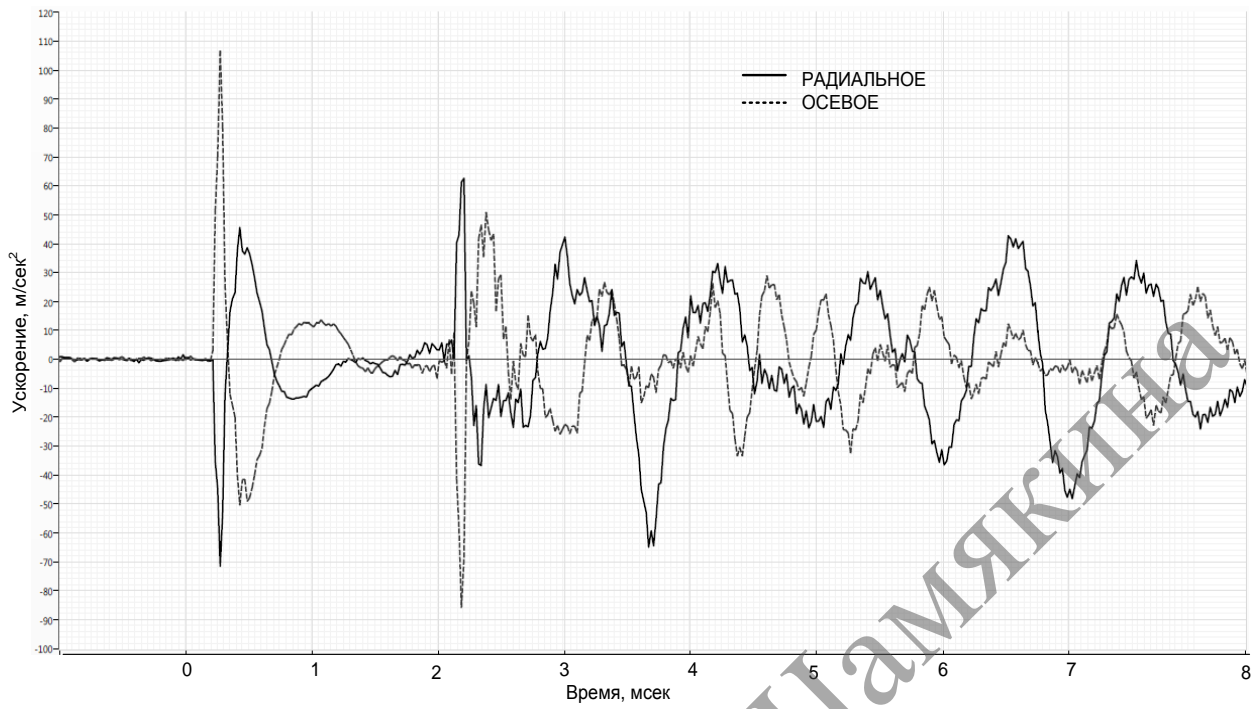


Рисунок 41. – Временные сигналы радиального и осевого ускорения

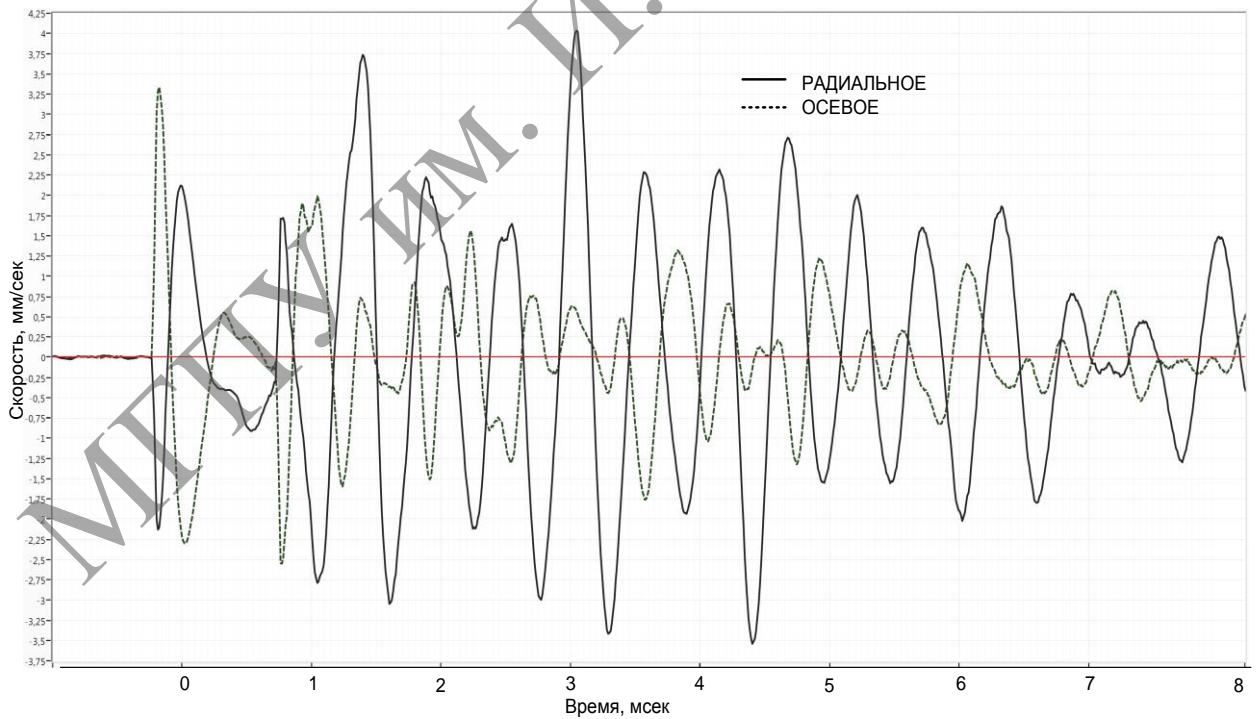
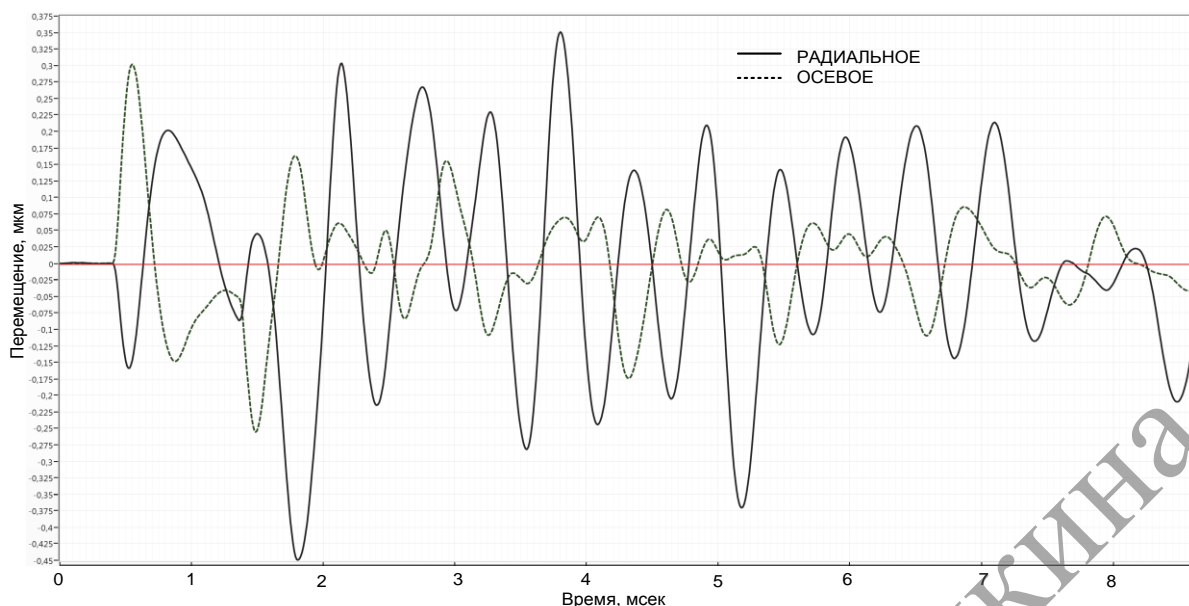
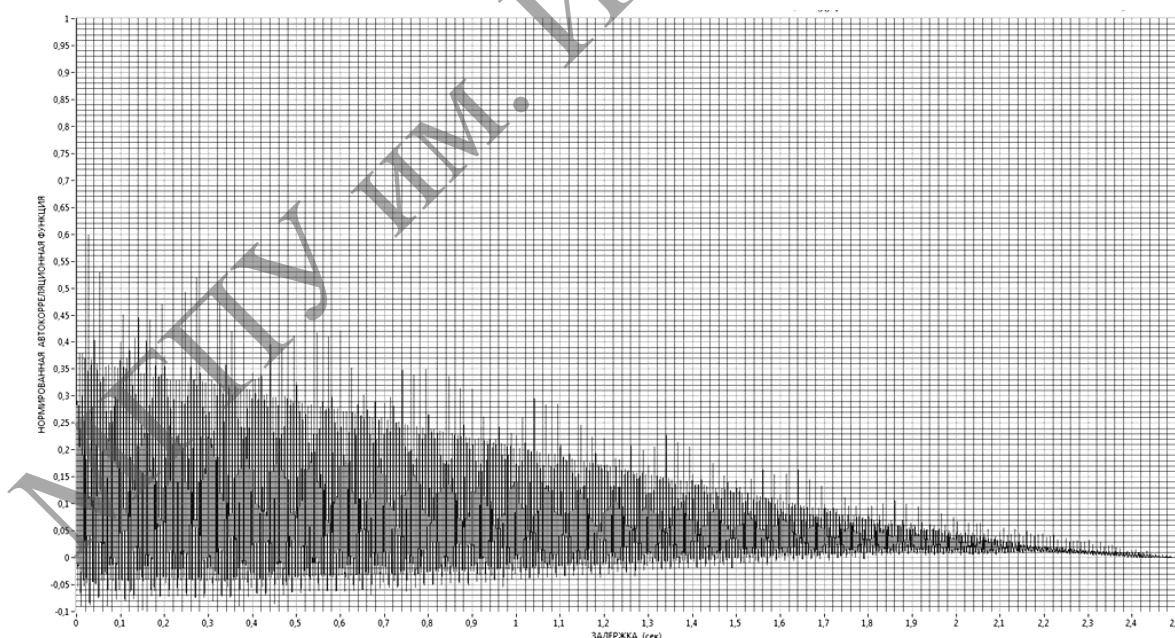


Рисунок 42. – Временные сигналы радиальной и осевой скорости



**Рисунок 43. – Временные сигналы радиального и осевого перемещения**

С точки зрения статистических свойств вибрационных сигналов полученные данные показывают, что такие вибрационные процессы могут рассматриваться как эргодические, что подтверждается тем, что автокорреляционная функция для них стремится к нулевому значению, как показано на рис. 44. Это позволяет использовать получаемые оценки для прогнозирования времени безотказной эксплуатации электропроводящих элементов мощного оборудования.



**Рисунок 44. – Диаграмма вибрационных сигналов**

Получаемые данные автоматически записываются в измерительные файлы, которые затем обрабатываются в заданном режиме с применением пакета LabVIEW. Результаты выводятся в виде отчета на печать. Пример диаграммы программы обработки данных об эксперименте представлен на рисунке 45.

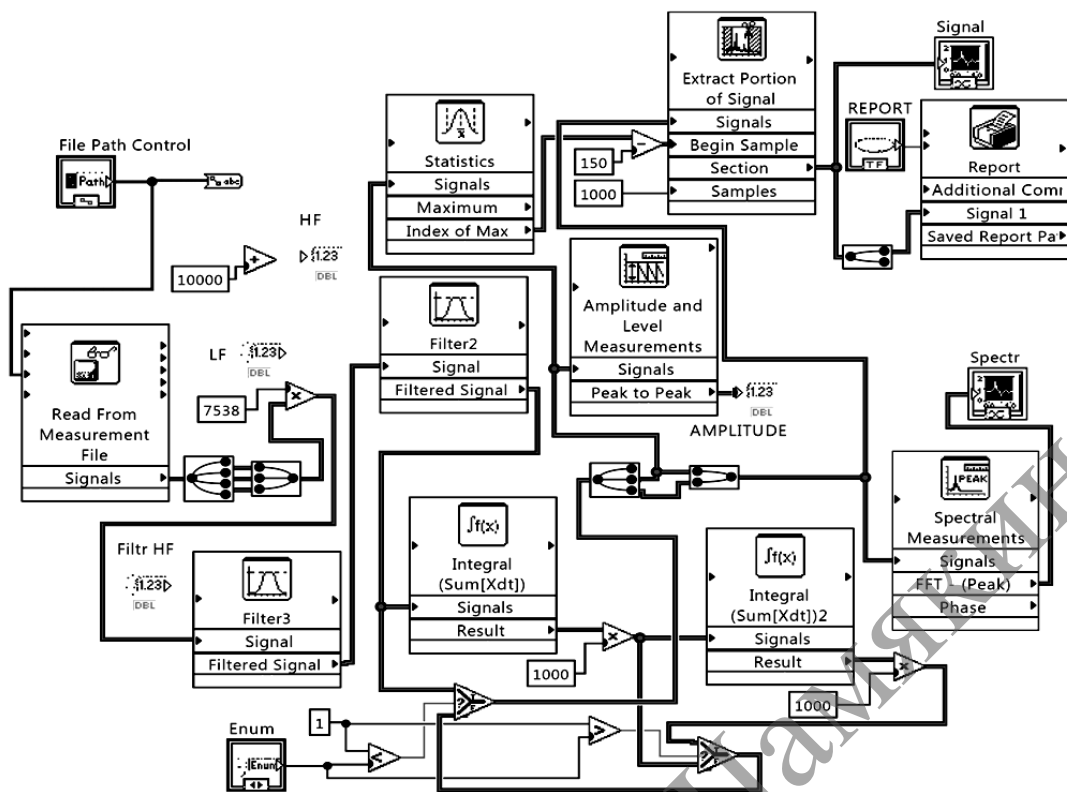


Рисунок 45. – Диаграмма программной обработки

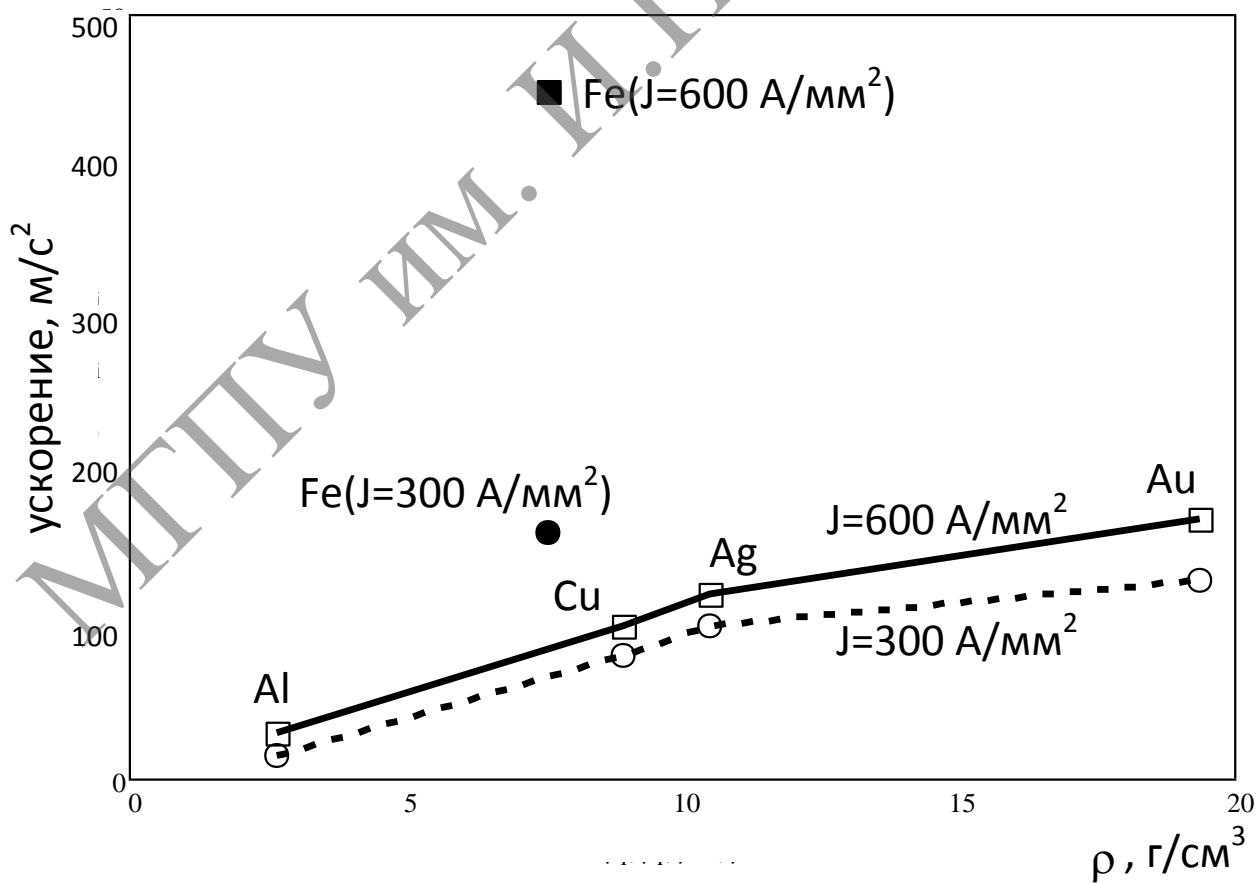


Рисунок 46. – Зависимости одновременного действия радиального и осевого ускорений

Зависимость одновременного действия радиального и осевого ускорений, фиксируемых трехкомпонентным датчиком ускорения (рисунок 46), может быть отображена в виде графика перемещения результирующего вектора в плоскости, проходящей через ось образца (рисунок 47).

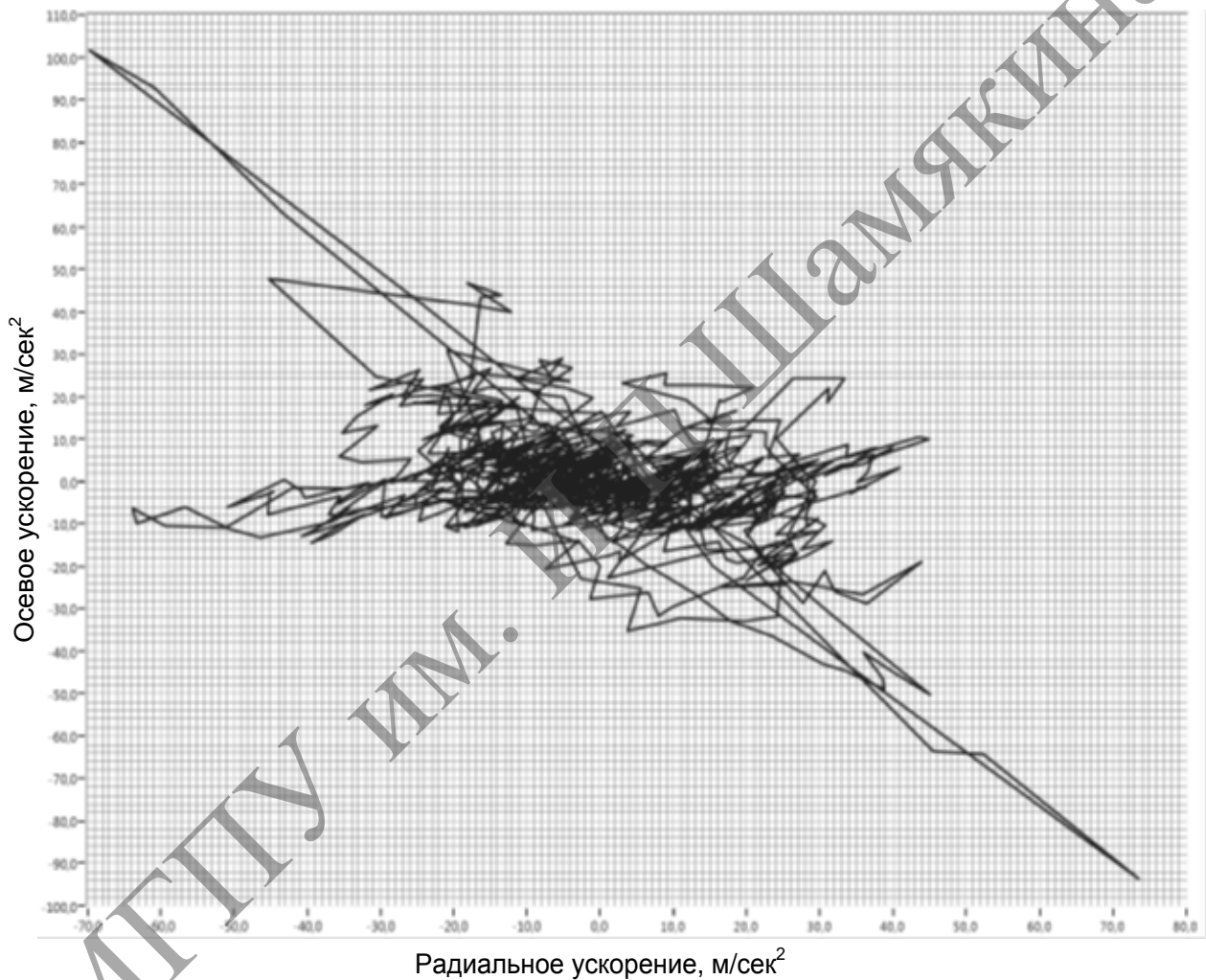
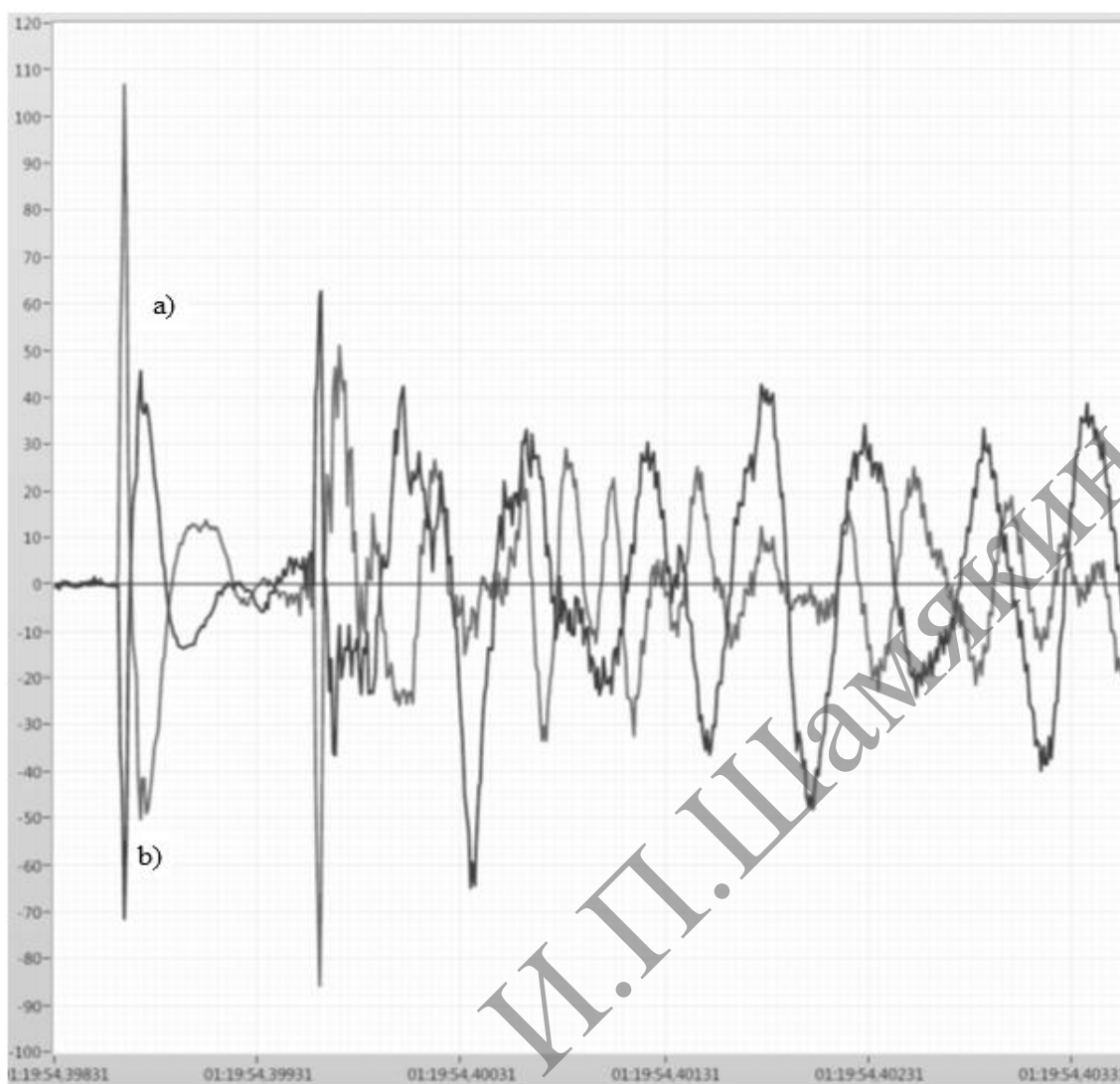


Рисунок 47. – Перемещения результирующего вектора



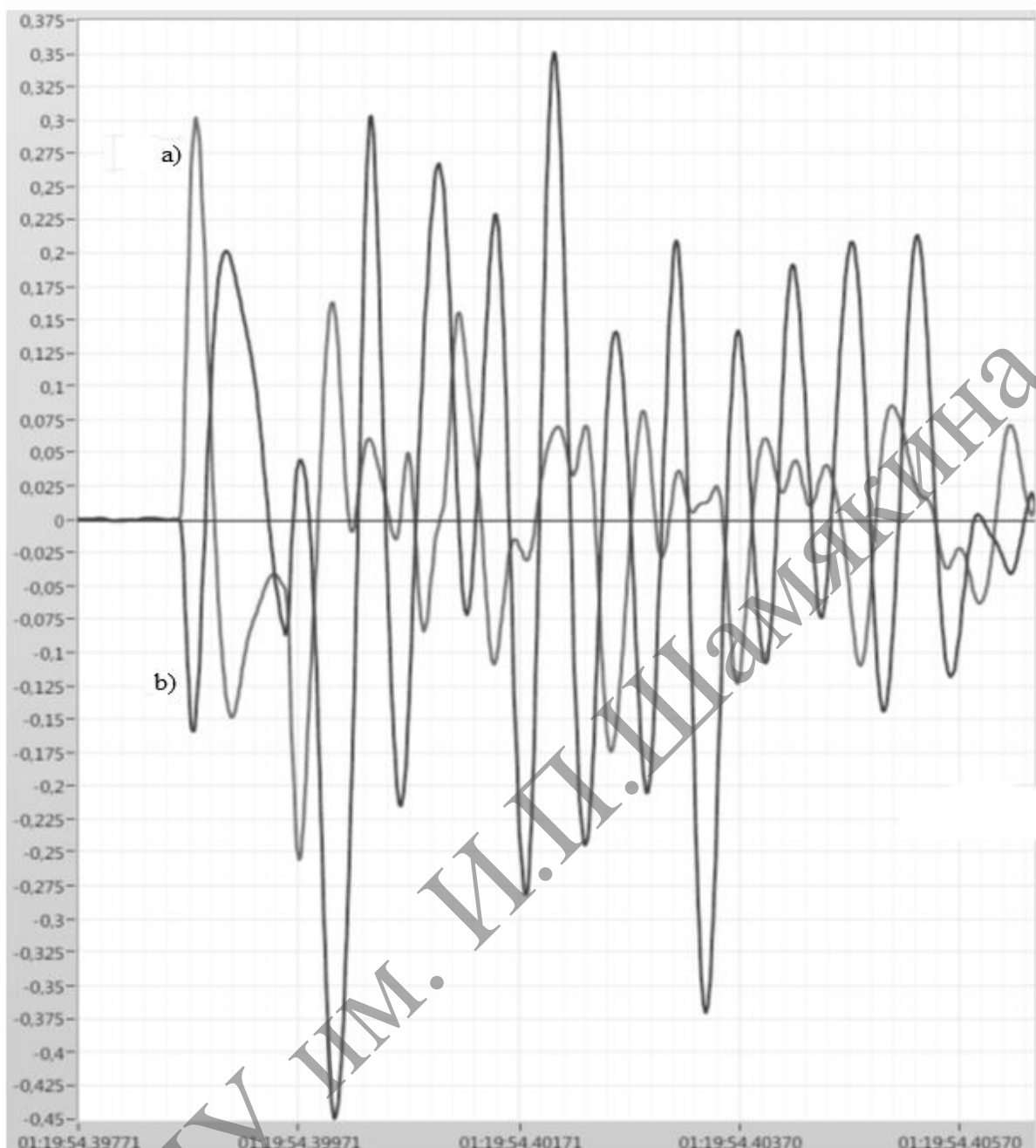
а) – осевое; б) – радиальное. Полоса частот 2кГц-20 кГц.

**Рисунок 48. – Ускорение в м/сек<sup>2</sup> от времени для импульса тока на серебряном образце (стержень диаметром 4 мм), импульс длительностью 1 мсек:**

Если в качестве контролируемой величины используется размах виброперемещения для ряда мощного электрооборудования, например генераторов, наблюдается снижение уровня вибрации с ростом мощности [69]. В некотором роде аналогичная зависимость наблюдается и при контроле вибрации турбины после прохождения nereкомендуемых зон работы. Для последних наши измерения показывали, что основные составляющие вибрации перемещались в зону более высоких частот, находящихся за стандартным диапазоном измерения вибрации, для которых измерения виброперемещений мало информативны. Возможно, и анализ причин снижения вибрации генераторов с ростом мощности изложенных в [69] следует провести более тщательно (в более широкой полосе частот).

Сравнительные характеристики вибрационного отклика для различных материалов, показывающие, что при равных условиях (одинаковые геометрические размеры и плотности тока) неферромагнитные материалы с меньшей удельной плотностью обеспечивают меньший вибрационный отклик.





a) – осевое; b) – радиальное. Полоса частот 2кГц-20 кГц

**Рисунок 49.** – Зависимость виброперемещения в мкм от времени для импульса тока на серебряном образце (стержень диаметром 4 мм), импульс длительностью 1 мсек

Свойства стальных образцов могут существенно отличаться от образцов проводников из других материалов. Воздействие тока и связанного с ним магнитного поля вызывает механические напряжения, но одновременно имеется зависимость магнитных свойств от прилагаемых напряжений [70].

Известны работы, которые позволяют связать прочностные и механические свойства материалов проводников со структурой материала на атомарном уровне [71, 72].

Экспериментально подтверждены эффекты сжатия не только проводников, но и гранулированных материалов при магнито-импульсном воздействии, обеспечивающем неравномерное распределение плотности по радиусу образцов из гранулированных наноматериалов [73]. Токопроводящие обмотки мощных генераторов могут быть выполнены как сплошными, так и полыми. Вопросы разрушения трубчатых образцов при радиальной нагрузке рассмотрены, например, в [74–77], но только для одного действующего фактора. Учет совместного механического, электромагнитного и теплового механизмов деформации требует использования моделирования, но и в этом случае потребуется описание соответствующих явлений, происходящих в проводниках и их взаимного влияния. Например, в [78] эффект продольного расширения объясняется из решения уравнения Похгамера-Кри при величине модуля Пуассона равном  $1/3$ . Продольные колебания в образцах возникают как в радиальном, так и поперечном направлении [79].

В настоящее время нет достаточно полной модели, описывающей динамическое совместное действие механических, электромагнитных, тепловых эффектов в проводниках при воздействии мощных импульсных токов, позволяющее прогнозировать прочностные характеристики при многоцикловом воздействии.

Вибрация может иметь значительную величину не только в стандартном частотном диапазоне, охватывающем оборотную и полюсную частоты, но и проявляться в более высокочастотной области и при проведении исследований желательнее расширить область контроля по частоте до 10 кГц.

При выборе аппаратурных средств контроля и диагностики состояния генератора с учетом как функций автоматической защиты, реагирующей на быстрое развитие значительных дефектов, непосредственно угрожающих целостности конструктивных элементов, для чего достаточно контроля в относительно узкополосной области, необходимо принимать во внимание и требования диагностики зарождающихся дефектов, вызывающих необходимость контроля в существенно более широкой полосе по ускорению с привлечением современных методов, например, анализа нестационарных и ударных процессов.

Анализ разрушения тонких металлических проводников при прохождении импульсов тока, которые были положены в основу ранее проведенных исследований, проведенный в [80] показал, что фрагментация образцов и величины сил, связанных с пинч-эффектом, требует для своего объяснения образования продольных волн сжатия-растяжения. Следует отметить, что приведенный анализ основан на экспериментах, при которых уровень токов достаточен для разрушений, а толщина испытываемых проводников крайне незначительна.

Взаимодействие электромагнитных импульсов с металлами порождает множество различных эффектов, как виброакустических, так и связанных с изменением состояния вещества с генерацией протонов, рентгеновских лучей и т. п. [81]. Прямые измерения пространственного вибрационного отклика на внешние воздействия электромагнитной природы на металлические образцы позволяют лучше понять сложную совокупность происходящих при этом явлений с использованием простых измерений и хорошо развитой и доступной аппаратуры и программных средств.

Действие импульсного тока на металлы и сплавы сопровождается действием электродинамического давления на проводник от собственного магнитного поля. Это явление, называемое пинч-эффектом, связано с действием сил Лоренца на электронную систему металла собственного магнитного поля [82, 84]. Эти силы сжимают электронную систему к оси образца. Возникающее при этом радиальное поле Холла препятствует дальнейшему сжатию образца. Действие короткого импульса тока также сопровождается проявлением скин-эффекта, связанного с перераспределением плотности тока по сечению проводника [85]. Изменения плотности электронов сопровождаются действием зарядов на ионную решетку металлов, вызывая ее деформации. Кроме этого, прохождение тока через проводник сопровождается выделением тепла. Совокупность указанных явлений вызывает механический отклик материала проводника на пропускание импульсного тока. Такие механические колебания подобны воздействию ультразвука и приводят к частичным пластическим деформациям [86, 87].

При действии импульсного тока возможна оценка возникающих механических колебаний в токоведущих элементах с помощью датчиков вибраций [88]. Механический отклик (в виде ускорения) на действие импульсного тока возрастает с увеличением статической нагрузки. Увеличение статической нагрузки приводит также к росту затухания колебательных процессов, вызванных действием импульсного тока [89–91]. При нагружении металлических проводников воздействие импульсного тока дополнительно может сопровождаться частичным изменением механических свойств материала.

Полученные результаты указывают на сложный характер механизма возбуждения механических колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсов тока высокой плотности. Данная методика может быть применена в исследованиях по циклической прочности элементов мощного электрооборудования [92, 93]. Примером конструктивных элементов, испытывающих комплексное воздействие электромагнитных сил, температуры и механических, являются элементы обмоток генераторов, двигателей и трансформаторов. Обеспечение их надежной работы при интенсивной эксплуатации в течение длительного времени – важная научно-техническая задача, одним из путей решения которой является применение

импульсов тока при испытаниях на циклическую прочность и для неразрушающего контроля деформаций в конструкциях при статическом нагружении. Ниже приведены результаты исследования вибрационного отклика на пропускание импульсного тока для различных материалов и параметров импульса. Также рассмотрены возможности увеличения таких вибраций и связанных с ними деформационных процессов за счет управления параметрами импульсов тока.

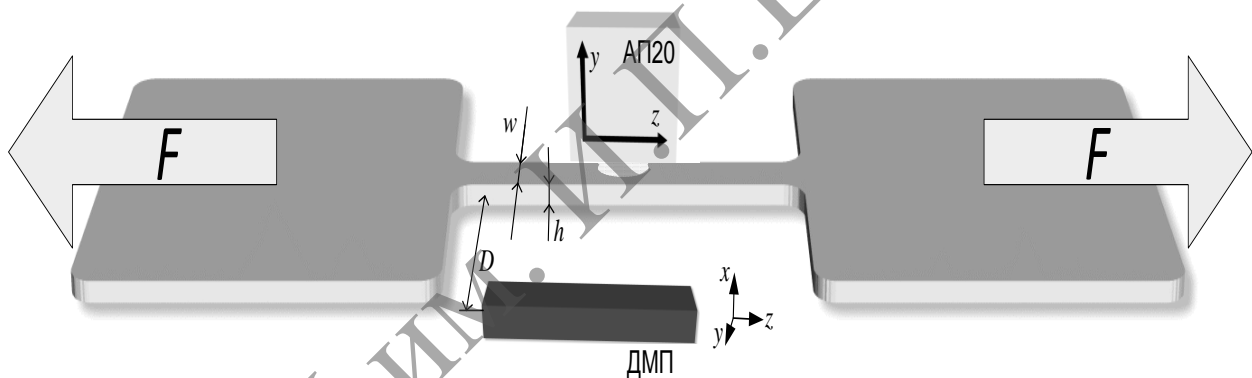
Сплошные и трубчатые проводники, применяемые в технике в качестве токопроводящих элементов в мощных генераторах, трансформаторах и других электротехнических конструкциях, подвержены значительным механическим колебаниям, в том числе, в условиях повышенных температур, под действием пондеромоторных сил при пропускании тока. Надежная работа этих элементов важна для обеспечения безопасности. Оценка вибрационной прочности токопроводящих элементов наряду с другими причинами требует также учета вибрационных эффектов, возникающих в самом проводнике как следствие скин-эффекта и пинч-эффекта. Согласно теоретическим оценкам, величина возникающих механических напряжений и средний уровень сдвиговых механических напряжений в металле, обусловленных электродинамическим давлением магнитного поля тока (пинч-эффект), пропорционален квадрату плотности тока и площади сечения проводника.

#### **2.4.1. Упругие деформации проводника при пропускании импульсного тока**

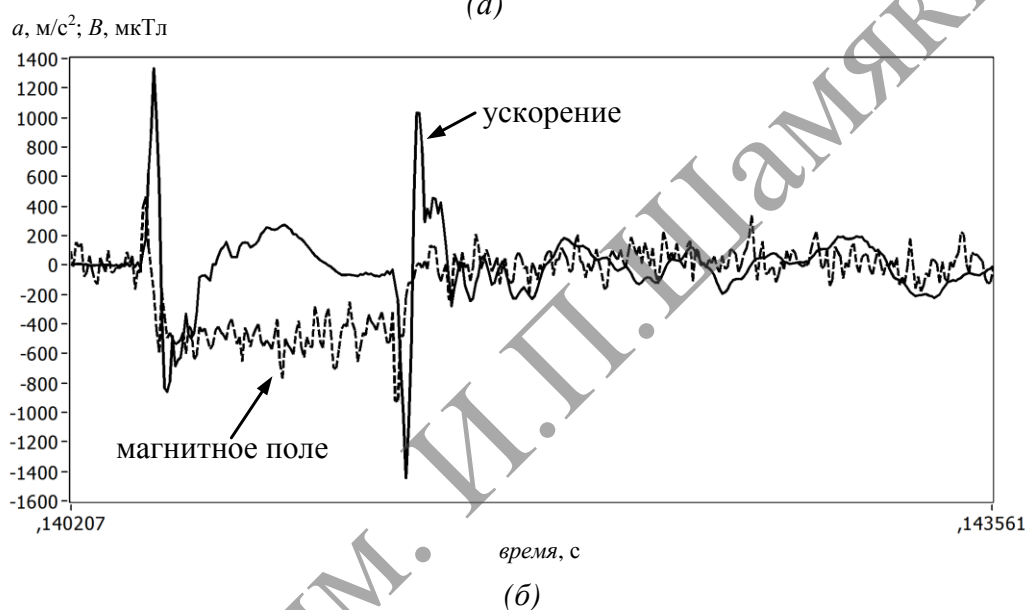
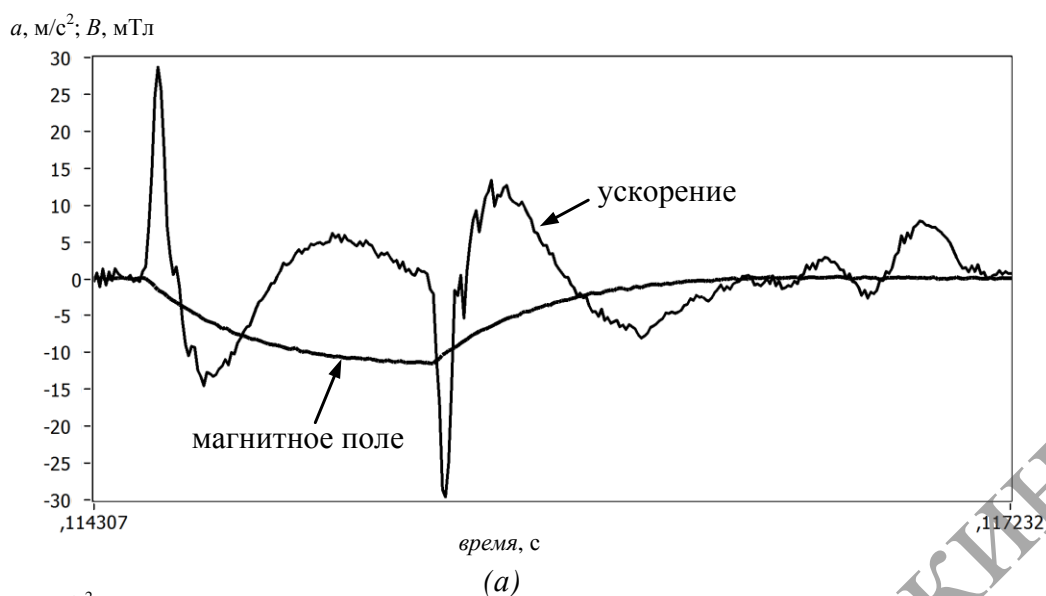
На рисунке 50 приведена схема установки (стенда) для измерения вибраций в плоских образцах. В качестве оценки вибрационного отклика на прохождения импульсного тока выделялась максимальная амплитуда вибрации и определялось ускорение материала образца в радиальном и осевом направлениях.

При действии импульсов тока возникающие переходные процессы в моменты перехода от поверхностного распространения тока (скин-эффект) к действию радиальных сил сжатия (пинч-эффект) вызывают формирование наряду с радиальными ускорениями осевых ускорений, действующих на фоне температурного расширения в осевом направлении. Силы радиального сжатия при ограничении расширения в осевом направлении приводят к имплозии образца. Радиальное и осевое ускорения коррелированы между собой и достигают максимальной величины в момент окончания фронта импульса тока. После окончания импульса тока в образце наблюдается затухающий колебательный процесс, связанный с распространением продольных виброакустических колебаний.

Трехкомпонентные датчики вибрации (пьезоэлектрические акселерометры АП20) закреплены на поверхности образца через изолирующую прокладку, а контроль тока может выполняться бесконтактными датчиками (М) магнитного поля, которые также могут фиксировать три пространственных компоненты поля [94, 95]. Сигналы с датчиков поступают через многоканальное устройство сбора данных, например NI USB 4431, в компьютер. Функции сбора, хранения результатов и анализа сигналов реализованы с использованием программного пакета LabVIEW. Для обеспечения удовлетворительной помехоустойчивости используется частотная адаптивная фильтрация сигналов, обеспечивающая подавление помех связанных с работой мощного источника токовых импульсов. Образец может быть дополнительно нагружен статической силой  $F$ , как показано на рисунке 50.



**Рисунок 50.** – Стенд измерения вибраций с подключением цилиндрического образца к блоку формирования импульсов-БФИ и плоский образец с установленным на нем трехкомпонентным пьезоэлектрическим акселерометром АП20 и расположенным над рабочей частью трехкомпонентным датчиком Холла ДМП на основе микросхем DRV5053



а) – из меди; б) – из нержавеющей стали

**Рисунок 51. – Временные зависимости сигналов от датчиков вибрации и магнитной индукции для образцов**

На рисунке 51, 52 приведены зависимости радиальной (вертикальной) составляющей вибрационных сигналов и кольцевой компоненты магнитного поля вокруг образца, пропорциональной мгновенным значениям тока через образец, для различных материалов (медь, нержавеющая сталь, титан). Электрические свойства таких материалов существенно различаются. Глубина скин-слоя изменяется от очень малой для меди до очень большой, соизмеримой с поперечными размерами образца, для титана. При длительности импульса тока около миллисекунды в образцах из меди увеличение магнитного поля и тока происходит сравнительно медленно, для образцов из нержавеющей стали форма импульса тока и магнитного поля близка к прямоугольной, а для образцов из титана характерно наличие выбросов на переднем и заднем фронтах импульса.

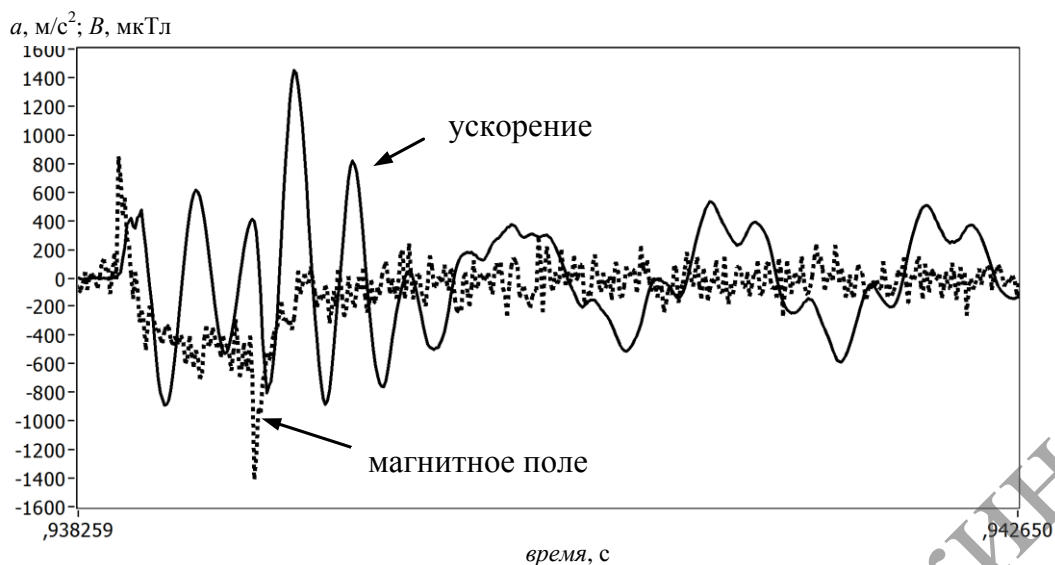
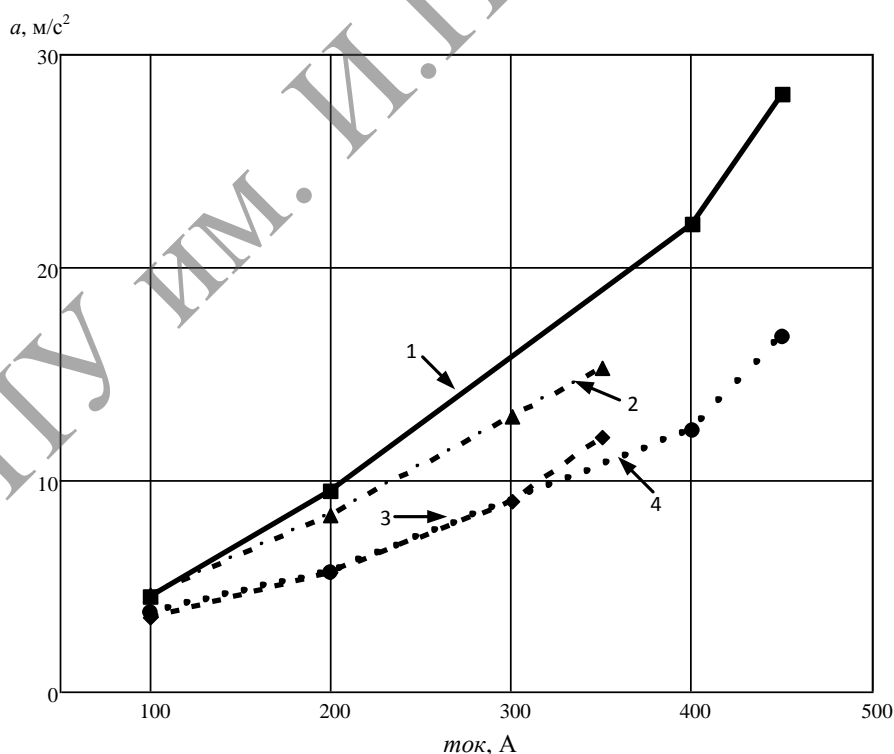


Рисунок 52. – Временные зависимости сигналов от датчиков вибрации и магнитной индукции для образца из титана

#### 2.4.2. Динамическое действие тока на образцы без статического нагружения

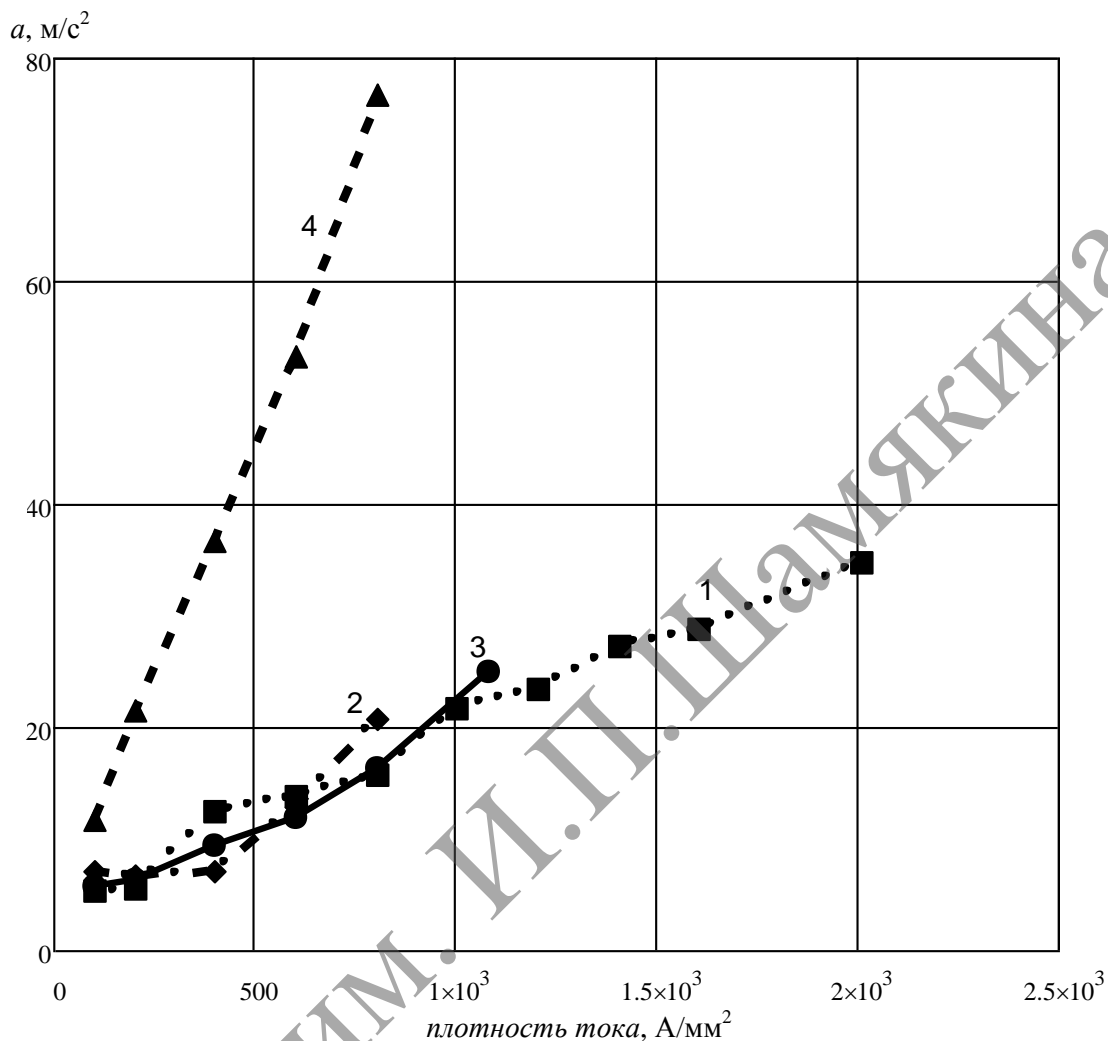
На рисунке 53 приведены зависимости размаха радиального ускорения от величины тока и плотности тока для различных образцов из меди с различными вариантами крепления образца.



кривая 1 (датчик в области конца консольно закрепленного образца); 2 – датчик в области свободного конца консольно закрепленного образца; 3 – датчик в левой части подвешенного образца; 4 – датчик подвешенного в правой части образца

Рисунок 53. – Зависимость размаха радиального ускорения от действия одиночных импульсов тока разной амплитуды длительностью  $5 \cdot 10^{-4}$  с для недеформируемых образцов медной трубки диаметром 11 мм (внутренний 8 мм)

На рисунке 54 приведены зависимости размаха ускорений от величины плотности тока для образцов из серебра в виде сплошных стержней круглого сечения при различном диаметре.



**Рисунок 54.** – Зависимость среднего размаха значения радиального ускорения от амплитуды плотности тока одиночных импульсов длительностью  $5 \cdot 10^{-4}$  с для образцов серебра круглого сечения диаметром 1, 2, 3, 4 мм, –соответственно кривые 1, 2, 3, 4

Зависимость размаха колебаний от амплитуды тока или от амплитуды плотности тока, как следует из приведенных результатов, близка к линейной. Такие зависимости могут быть связаны со сложным характером возбуждения колебаний импульсными токами, при которых проявляется действие различных механизмов формирования колебаний (тепловой, пинч-эффект, скин-эффект, деформации, связанные с изменениями фазового состояния, магнитогидродинамические процессы) [83, 96–101].

Величина мгновенных значений тока через образец может контролироваться по сигналам от датчика магнитной индукции. Если в качестве измеряемого параметра использовать размах этой величины, зависимости размаха ускорения для различных материалов близки к линейным.



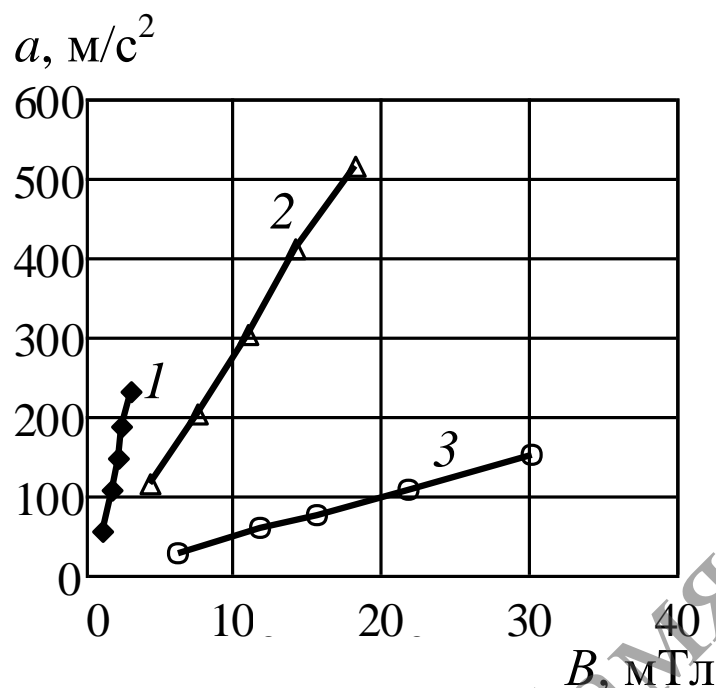


Рисунок 55. – Зависимость размаха ускорения от размаха магнитной индукции, создаваемой протекающим через образец электрическим током

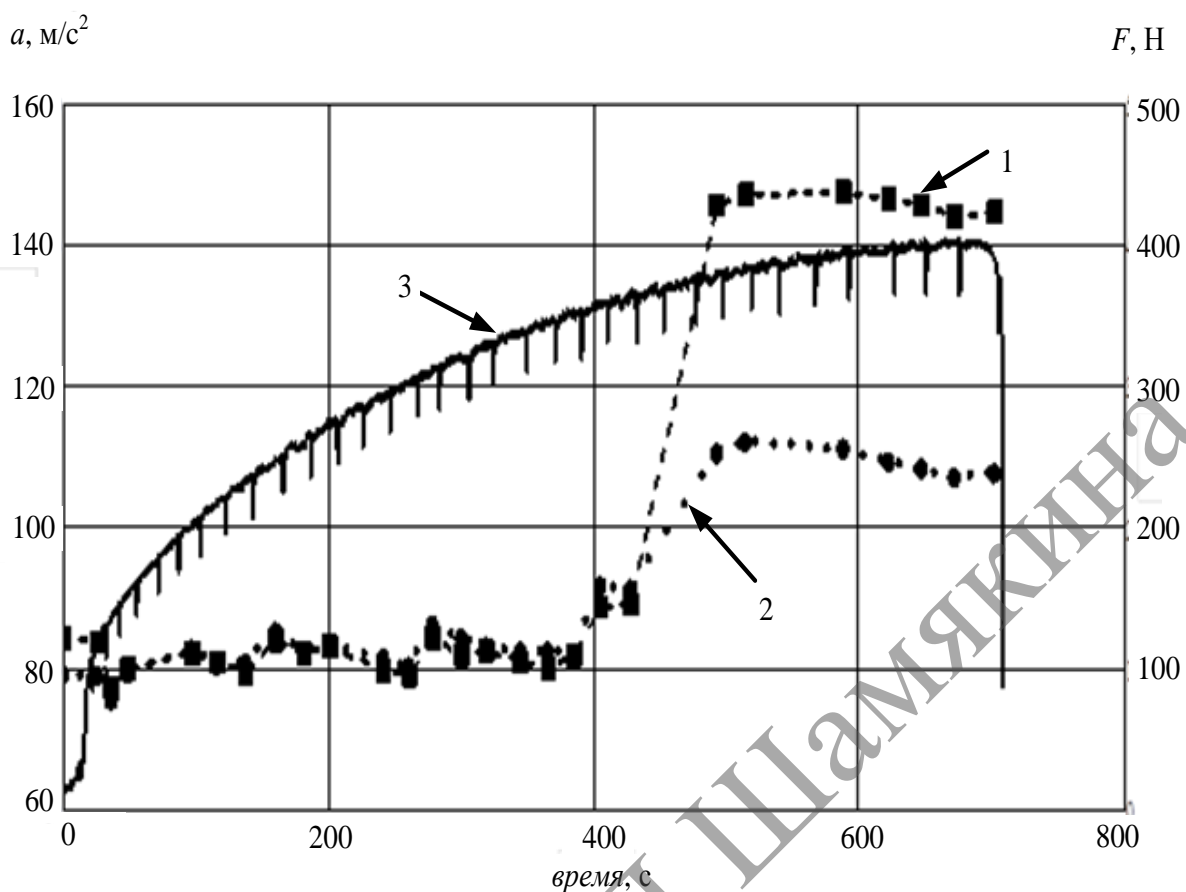
### 2.4.3. Измерения действия тока на плоских деформируемых образцах

Одновременное действие динамических нагрузок, вызываемых импульсными токами, и статического нагружения внешней, медленно увеличивающейся силой, выполнялось на образцах, внешний вид которых приведен на рисунке 56.

Образец может быть дополнительно нагружен статической силой  $F$ .

Проводники, через которые пропускались импульсы тока, испытывались на разрыв с записью зависимости величины, растягивающей силы от времени. Образцы деформировались до разрушения, как без тока, так и при пропускании импульсов тока. Действие импульсного тока за счет пинч-эффекта проявляется, в первую очередь, в направлении, перпендикулярном плоскости образца ( $y$ ), но на переходных режимах из-за перераспределения токов по сечению из-за скин-эффекта имеются значительные силы и ускорения в продольном направлении ( $z$ ). Величина ускорений увеличивалась с ростом плотности тока.

На рисунке 56 приведены зависимости от времени ускорений и величины статической нагрузки для образца из латуни. Для измеренного размаха ускорений характерно существенное изменение скорости при некотором уровне статической деформации, что связано с изменениями фазового состояния материала образца.

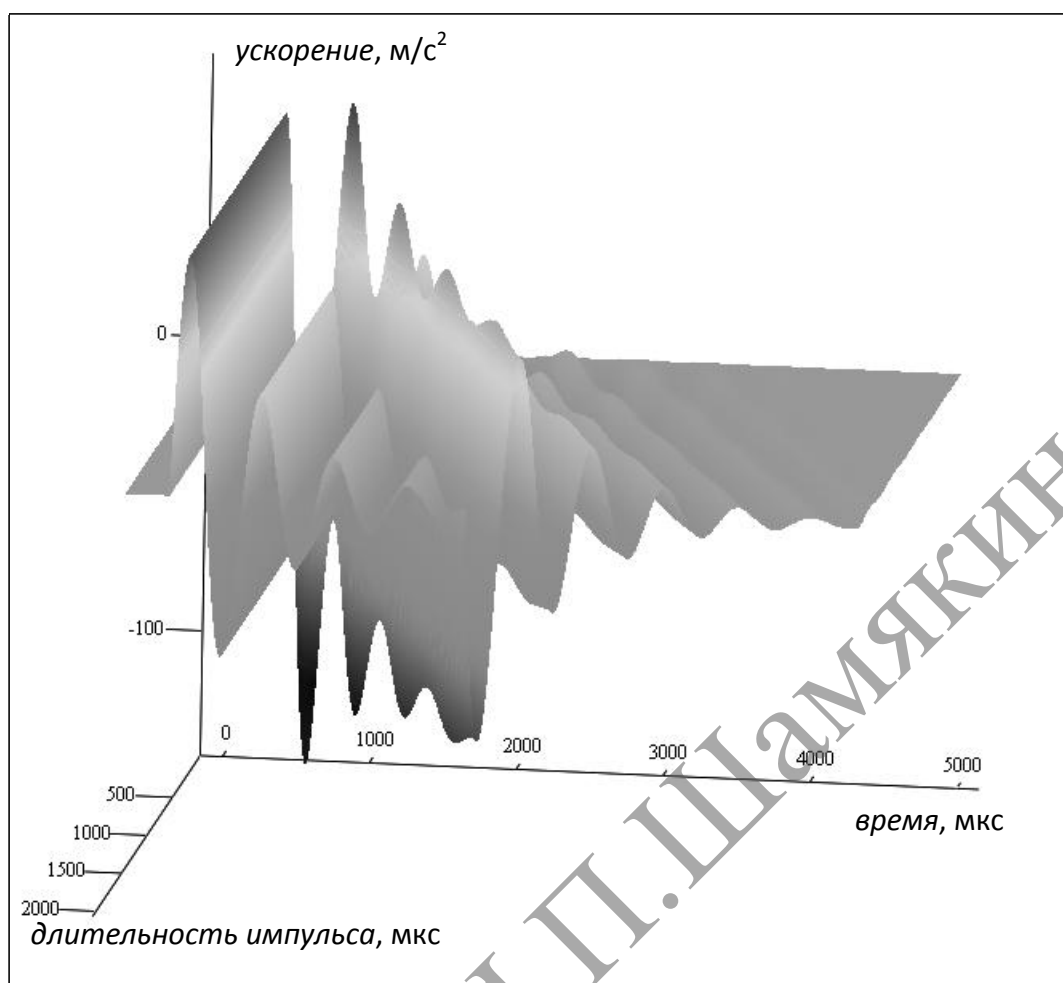


**Рисунок 56. – Зависимость от деформации (времени) максимального осевого ускорения кривая 1, перпендикулярного ускорения кривая 2, а также величины приложенной статической силы  $F$  кривая 3 (шкала справа)**

Как следует из рисунка 56, скачкообразное изменение размаха ускорения происходит при статических деформациях 50–65 % от значений, соответствующих разрушению образца.

Возбуждение колебания образца связано, в первую очередь, с моментами прохождения переднего и заднего фронтов импульса тока. На фронтах формируются затухающие колебания, которые складываются после окончания импульса тока. На рисунке 57 приведены зависимости от времени результирующих вибрационных процессов в зависимости от длительности импульса тока.

Результаты такого сложения с учетом фаз колебаний обеспечивают увеличение и снижение амплитуд колебаний в области сравнительно коротких длительностей импульса тока [102].



**Рисунок 57. – Зависимости результата сложения вибрационных сигналов, формируемых под действием переднего и заднего фронтов импульса тока для различных длительностей импульса**

Экспериментальные результаты могут быть представлены математической моделью:

$$\begin{aligned}
 V1(t) &= A \cdot \begin{cases} 0 & t < ts \\ \sin[\omega \cdot (t - ts)] \cdot e^{-\frac{t-ts}{\tau}} & t \geq ts \end{cases} \\
 V2(t) &= -A \cdot \begin{cases} 0 & t < te \\ \sin[\omega \cdot (t - te)] \cdot e^{-\frac{t-te}{\tau}} & t \geq te \end{cases}
 \end{aligned} \tag{21}$$

где  $ts$  и  $te$  время соответственно начала и окончания импульса тока.

Параметр  $\tau$ , характеризующий процесс затухания, может быть определен из временных диаграмм и позволяет оценить состояние образца.

Результаты численного моделирования с использованием этой модели для различных длительностей импульса тока представлены на рисунке. Представленная модель хорошо согласуется с данными экспериментов.

Управление виброакустическими колебаниями в металле не только за счет изменения амплитуды импульсного тока, но и сравнительно малыми изменениями длительности позволит расширить возможности управления электропластической обработкой металлов. Управление амплитудой колебаний за счет изменения длительности технически выполнить проще, чем регулирование токов большой величины.

Контроль вибрации и магнитного поля позволяет оценить эффективность процесса преобразования энергии электрического импульса в энергию магнитного поля и в энергию механических колебаний.

Энергия электрического импульса, протекающего через образец, преобразуется в джоулевское тепло:

$$Q = \int_{ts}^{te} I^2(t) R dt \quad (22)$$

где  $R$  – сопротивление образца, рассчитываемое для удельного сопротивления и размеров образца для данного материала;

$ts$  и  $te$  – время начала и окончания импульса тока;

$I(t)$  – определяется по измерениям калиброванного датчика магнитной индукции как функция времени.

Ток определяется через индукцию магнитного поля по соотношению:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot I}{r} \quad (23)$$

где  $\mu=1$  для неферромагнитных металлов;

$r=0.07$  – расстояние датчика магнитного поля от образца;

$\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Тл·м/А;

Отсюда  $I=B \cdot r / 8 \cdot 10^{-7}$ .

Импульс тока при прохождении через образец преобразуется в магнитное поле, которое за время действия импульса накапливает энергию магнитного поля  $W$ :

$$W = \frac{L \int_{ts}^{te} I^2(t) dt}{2(te - ts)} \quad (24)$$

где  $L$  – индуктивность образца. Индуктивность цилиндрического образца [14] длиной  $l$  и радиусом  $r$ :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[ \ln \left( \frac{2l}{r} \right) - 1 \right] \quad (25)$$

Для проводника прямоугольного сечения выражение аналогичное, но вместо радиуса – среднее геометрическое от функций размеров сторон внешнего поперечного прямоугольного сечения. Энергию механических колебаний  $E$  образца можно оценить по соотношению:

$$E = \frac{M \int_{ts}^{te'} v^2(t) dt}{2(te' - ts)} \quad (26)$$

где  $M$  – масса образца;

$te'$  – время затухания колебательного процесса в образце, вызванного действием импульсного тока, до уровня ниже уровня вибрационного шума, фиксируемого датчиком вибрации;

$v(t)$  – сигнал вибрационной скорости, получаемый из сигналов вибрационного ускорения, поступающего от пьезоэлектрического акселерометра с использованием интегрирования.

В таблице 3 приведены данные о характеристиках трех образцов.

Таблица 3

Материал	Масса (г)	R (МОм)	L (нГн)	$\delta$ (мм)	Q (Дж)	W (мДж)	E (мкДж)
сталь нержавеющая 0,2x4x30 I=280A	0,173	4,5	26,03	1,38	0,314	1,02	159
медь 0,5x3x30 I=2500A	0,402	0,342	24,13	0,2	1,919	75	2931
латунь 0,5x3x30 I=1700A	0,383	0,84	24,13	0,394	2,161	35	12290

Соотношения между тепловой энергией, энергией магнитного поля и энергией механических колебаний представлены как «коэффициенты полезного действия» таких преобразований.

Таблица 4

Материал	КПД ( $Q \Rightarrow W$ )	КПД ( $W \Rightarrow E$ )	КПД ( $Q \Rightarrow E$ )
сталь нержавеющая	0,33 %	15,6 %	0,05 %
медь	3,9 %	3,9 %	0,15 %
латунь	1,6 %	35 %	0,57 %

Оценка преобразования энергии электрического импульса в энергию деформирования образца существенна при выборе режимов электропластической обработки. Значительный разброс таких коэффициентов не позволяет однозначно предсказать параметры подобных процессов. Полученные данные о формировании затухающих колебательных процессов и возможность увеличения амплитуды таких колебаний при выборе длительности импульса тока обеспечивают возможность оптимизации выбора режимов обработки. Для обеспечения прогнозирования

поведения образцов с различными геометрическими размерами из различных материалов целесообразно продолжить исследование особенностей соотношений между процессами преобразования электрических импульсов в механические деформации.

#### **Выводы.**

1. Получены экспериментальные результаты по динамическому эффекту механического действия тока как при отсутствии внешнего статического нагружения, так под действием статической нагрузки.

2. Разработана методика измерения многомерных вибраций, создаваемых импульсами тока и контроля последнего многокомпонентными датчиками магнитного поля.

3. Установлено, что величину механического эффекта действия тока можно с высокой достоверностью фиксировать и исследовать с помощью многокомпонентных пьезоэлектрических преобразователей акселерометров.

4. Увеличение статической нагрузки вызывает рост затухания колебательных процессов, вызванных действием импульсного тока.

5. Действие импульсного тока и контроль возникающих при этом вибраций можно использовать для неразрушающего контроля деформаций в конструкциях при их статическом нагружении.

6. Управление амплитудой и длительностью импульсов тока позволяет формировать ударные виброакустические процессы в металлических образцах.

7. Методика опытов позволяет оценить ресурс элементов обмоток мощного энергетического оборудования, начиная от режимов, близких к нормальным эксплуатационным до близких к аварийным, вызывающим разрушение конструкций.

## Использованная литература:

1. Кузмичев, В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузмичев. – Киев: Наук. Думка, 1989. – 864 с.
2. Nasilowski, J. Phenomena Connected with the Disintegration of Conductors Overloaded by Short-Circuit Current / J. Nasilowski // Przegląd Elektrotechniczny. – 1961. – P. 397–403.
3. Lukyanov, A. Do we need to recourse to Amper-Neumann electrodynamics to explain wire fragmentation in the solid state? / A. Lukyanov, S. Molokov // arXiv: physics/0012029v1[physics.class-ph], 14 Dec 2000.
4. Harris' shock and vibration handbook / Allan G. Piersol, Thomas L. Paez. – Sixth Edition. – McGraw-Hill, 2010. – 1225 p.
5. .Skal, A.S. The full Lorentz force formula reposable for turbulence in solids and fluids and explained faraday's paradox./ A.S. Skal.// International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol. 4, Issue 2. – P. 1–9.
6. Papageorgiou, C.D. Dipole Electromagnetic Forces on Thin Wires under Transient High Voltage Pulses./ C.D. Papageorgiou, T.E. Raptis. – [http://www.tara.tcd.ie/bitstream/2262/45861/1/PEER\\_stage210.1051%252Fepjap%252F2009182.pdf](http://www.tara.tcd.ie/bitstream/2262/45861/1/PEER_stage210.1051%252Fepjap%252F2009182.pdf)
7. Winterberg, F. Conjectured Transient Release Of Zero Point Vacuum Energy In Powerful Electric Discharges./ F. Winterberg.// Annales de la foundation Louise de Broglie. – 2006. – v.31, №4. – P. 363–373.
8. Fefferman, C.L. Existence and smoothness of the Navier Stokes equation / C.L. Fefferman. // Clay mathematical institute press, 2013. – 6 p.
9. Maniglia, J. Design, Fabrication, and Testing of an Electromagnetic Rail Gun for the repeated testing and simulation of Orbital DebrisImpacts./ J. Maniglia, J. Smiroldo, A. Westfall, G. Zohar. – <http://digitalcommons.calpoly.edu/aerosp/58/>. – 24 p.
10. Стащенко, В.И. Методы контроля тока в экспериментах генерации механических колебаний импульсными токами / В.И. Стащенко, О.Б. Скворцов.// Состояние и проблемы измерений: сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции./ НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2017. – С.106–109, ISBN 978-5-990630-3-9.
11. Пичугина, М.Т. Мощная импульсная энергетика: учебное пособие / М.Т. Пичугина. – Томск: ТПУ, 2005. – 98 с.
12. Система для измерения больших импульсных токов «СИБТ», 1 с.
13. MLX90614 family. Single and Dual Zone. Infra Red Thermometer in TO-39 / Melexis, 30 Mar 2009. – 44 p.
14. Батыгин, Ю.В. Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского / Ю.В. Батыгин, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт. – 2009. – №25.
15. Илларионов, А.Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие./ А.Г. Илларионов, А.А. Попов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.

16. Свойства металлических контактов на пленках  $TiO_2$ , изготовленных методом реактивного магнетронного распыления / В.В. Брус [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2010. – С. 60–62.
17. Скворцов, О.Б. Мониторинг магнитного поля с применением LABVIEW / О.Б. Скворцов // Сборник трудов XV международной конференции NIDays-2016, Москва 25 ноября 2016г. – М.: ДМК-пресс, 2016. – С. 190–193.
18. Скворцов, О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments / О.Б. Скворцов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013": сборник трудов XII международной научно-практической конференции NIDays-2013, Москва 2013г. – М.: ДМК-пресс, 2013. – С.78–80.
19. Васильев, А.И. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А.И. Васильев, Ю.И. Гайдуков // Успехи физических наук. – 1983. – Т.141, вып. 3. – С. 431–467.
20. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. By John G. Webster (Editor). – CRC Press, 1999.
21. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. ред. совет: В.Н. Челомей [и др.]. – М: Машиностроение, 1981.
22. Иориш, Ю.И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы / Ю.И. Иориш. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1963. – 772с.
23. Жемочкин, Б.Н. Теория упругости / Б.Н. Жемочкин. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 256 с.
24. Соколовский, В.В. Теория пластичности./ В.В. Соколовский. – 3-е издание. – Минск: Высш. шк., 1969.
25. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для студентов вузов / Н.Н. Малинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Машиностроение», 1975. – 400 с.
26. Рунов, Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов / Б.Т. Рунов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
27. Вибрация. Руководство по выбору критериев оценки вибрационного состояния машин: ГОСТ Р 56646-2015, 2017.
28. Lenk, A., Rehnitz, J. Schwingungsprüftechnik. Veb verlag technik. – Berlin, 1974 // Перевод: А. Ленк, Ю. Ренитц. Механические испытания приборов и аппаратов. – М.: Мир, 1976. – 272 с.
29. Скворцов, О.Б. Автоматизация вибрационной защиты гидроагрегатов / О.Б. Скворцов, Е.С. Трунин // Russia power. Hydro Vision Russia 2012, 5–7 марта 2012, PennWell, Конференция и выставка. Каталог. С. 20. <http://pennwell.websds.net/2012/Moscow>
30. Скворцов, О.Б. Выбор параметров контроля вибрации для систем непрерывного мониторинга состояния машин и агрегатов / О.Б. Скворцов // «Фундаментальные исследования и инновационные технологии



- в машиностроении»: научные труды II Международной научной конференции. – М.: ИМАШ РАН, 2012. С. 412–417.
31. Скворцов, О.Б. Датчики для измерения низкочастотной вибрации / О.Б. Скворцов // Датчики и системы. – 2017. – № 4. – С. 16–21.
  32. Скворцов, О.Б. Управление векторной чувствительностью многокомпонентных датчиков пространственных величин / О.Б. Скворцов // Приборы. – 2017. – № 8 (206). – С. 19–28.
  33. Кошкин, Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. – Наука, 1972. – 256 с.
  34. Taylor, M.J. Current-diversion around a fragmenting wire during the voltage spike associated with exploding wires / M.J. Taylor. – 9 p. – [http://www.profuseinternational.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/15. – Current-diversion-around-fragmenting-wire.pdf](http://www.profuseinternational.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/15.-Current-diversion-around-fragmenting-wire.pdf).
  35. Ускова, Н.И. Радиальные распределения быстро меняющихся токов и полей в цилиндрических проводниках / Н.И. Ускова, С.И. Ткаченко // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, вып. 14. – С. 59–63.
  36. Баранов, М.И. Квантовофизическая природа поверхностного эффекта в металлическом проводнике с переменным электрическим током проводимости. ISSN 2074-272X / М.И. Баранов // Электротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 34–40.
  37. Першин, В.Ф. Расчет на прочность тонкостенных оболочек вращения и толстостенных цилиндров: методическое пособие / В.Ф. Першин, Ю.Т. Селиванов. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2002. – 14 с.
  38. Vable, M. Mechanics of Materials. / M. Vable. – Oxford University Press, 2002. – 774 p.
  39. Smith, S.H. Mechanical Response of Solid Cylindrical Conductors to Axial Electrical Currents / S.H. Smith. // Journal of Applied Physics. – Vol. 39, Issue 11. – P. 5268–5274.
  40. Colin, J. Axial and radial interface instabilities of copper/tantalum cylindrical conductors / J. Colin, L. Thilly. // Acta mater. – 1999. – Vol. 47, N. 9. – P. 2761–2768.
  41. Завитаев, Э.В. Скин-эффект в тонкой цилиндрической проволоке из металла. / Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, А.А. Юшканов. // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, вып. 6. – С. 1041–1047.
  42. FOSA 3660 seismic fiber optical accelerometer for tri-axial monitoring application // Optoacoustics, 2007. – 2 p.
  43. FOA™ -200 Fiber Optic Accelerometer. VibrosystM, 2013. – 1 p.
  44. Fiberoptic Acceleration Sensor FAS-106/110/115 M5. MC-monitoring SA. – 05.11.2006. – 2 p.
  45. SSA-100 Fiber Bragg Grating-based accelerometer. Aniber Company Limited. – 2 p. – [http://www.anibertech.com/Aniber%20Specification/SSA-100 %20Accelerometer.pdf](http://www.anibertech.com/Aniber%20Specification/SSA-100%20Accelerometer.pdf)
  46. Глобал Тест. Каталог продукции. – 15.10.2013. – 180 с.

47. High Performance, Wide Bandwidth Accelerometer ADXL 001. Analog Devices, Inc., 2010. – 16 с.
48. Янчич, В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры)./ В.В. Янчич. – Ростов н/Д: Издательство ЮФУ, 2010. – 304 с.
49. High Performance, Wide Bandwidth Accelerometer ADXL001, Analog Devices, 2010. – 16 p.
50. Model 7131A Accelerometer. Triaxial IEPE Accelerometer Miniature Cube Hermetically Sealed, Titanium  $\pm 50g$  to  $\pm 2000 g$  Dynamic Ranges. Model 7131A Rev C, Measurement Specialties. – 3 p.
51. Model 354C10. Triaxial, thru-hole mtg, ceramic shear, miniature ICP® accelerometer. Installation and Operating Manual PCB, 2002. – 16p.
52. Walter, P.L. Placebo transducers: a tool for data validation. Ntchnical note TN-16 PCB, 2005. – 2 p.
53. Gamlin, M. Impulse current testing. Lightning Protection Forum. – Shanghai, June 2004. – 7 p.
54. Lipworth, G. Magnetic Metamaterial Superlens for Increased Range Wireless Power Transfer./ G. Lipworth and etc.// Scientific Report. – 10 January 2014. – v. 4. – 6 p.
55. Потери на вихревые токи в обмотках трансформаторов и в монтаже схемы. – <http://valvolodin.narod.ru/articles/WishriWrashdebnye.pdf>. – 12 p.
56. Терентьев, Д.Е. Высокочастотные свойства заземляющих проводников / Д.Е. Терентьев.// Электросвязь. – 2004. – № 11. – С. 24–25.
57. Адамов, Ю. Эквалайзеры в цифровых кабельных интерфейсах / Ю. Адамов, Я. Губин, О. Сомов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 3. – С. 70–74.
58. NI Dynamic Signal Acquisition User Manual // National Instruments. – November, 2010. – 96 p.
59. NI USB-443x Specifications.// National Instruments. – October, 2011. – 11 p.
60. Федосов, В.П. Цифровая обработка звуковых и вибросигналов в LabView: справочник функций системы NI Sound and Vibration LabVIEW / В.П. Федосов. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 1296с.
61. Скворцов, О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments./ О.Б. Скворцов.// Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013": сборник трудов XII международной научно-практической конференции NIDays-2013, Москва 2013 г. – М.: ДМК-пресс, 2013. – С. 78–80.
62. Исследование металлических образцов на статические и динамические нагрузки с применением аппаратуры National Instruments / О.Б. Скворцов [и др.].// Инженерные и научные приложения на базе технологий NI – NIDays 2014": сборник трудов XIII международной научно-практической конференции, Москва 19-20 ноября 2014 г. – М.: ДМК-пресс, 2014. – С. 121–123. ISBN: 978-5-97060-251.

63. Скворцов, О.Б. Мониторинг магнитного поля с применением LABVIEW / О.Б. Скворцов // Сборник трудов XV международной конференции NIDays-2016, Москва 25 ноября 2016г. – М.: ДМК-пресс, 2016. – С. 190–193. ISBN: 978-5-97060-490-8.
64. Lukyanov, A. Do we need to recourse to Amper-Neumann electrodynamics to explain wire fragmentation in the solid state?/ A. Lukyanov, S. Molokov // arXiv: physics/0012029v1[physics.class-ph], 14 Dec 2000.
65. Skvorcov, O.B. Estimation of vibrating durability of elements of hydro power turbines under operating conditions by results of vibration control by stationary systems of vibrating monitoring / O.B. Skvorcov // Новые тенденции в усталости и разрушений (NT2F13): материалы Международной конференции, Москва, 2013г. – М.: ИМАШ РАН, 2013. – Р. 205–222.
66. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
67. Claude Bathias, Paul Croce Paris. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. – 13 September, 2004 by CRC Press – 328 p.
68. Скворцов, О.Б. Перспективы развития нормативной базы и расширения вибрационного мониторинга роторного оборудования./ О.Б. Скворцов.// Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 46–53.
69. Рунов, Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов / Б.Т. Рунов. – Энергоиздат, 1982. – 352 с.
70. Мушников, А.Н. Построение модели поведения магнитных характеристик конструкционных сталей под действием упругих напряжений./ А.Н. Мушников // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета. – 2011. – № 4(5). – С. 2377–2378.
71. Вывод упругого закона кристаллов металлов из потенциала межатомного взаимодействия./ И.Ю. Зубко [и др.] // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета. – 2011. – № 4(5). – С. 2181–2183.
72. Коврижных, Ф.Б. Модель деформирования и разрушения материала в условиях ползучести / Ф.Б. Коврижных // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета. – 2011. – № 4(5). – С. 2241–2243.
73. Моделирование радиального магнито-импульсного уплотнения гранулярной среды в квазистатическом приближении./ Г.Ш. Болтачев [и др.]. // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 10. – С. 58–67.
74. Бойко, М.М. Радиальное разрушение и пластичность стальных цилиндрических оболочек при взрывном нагружении / М.М. Бойко, В.Ф. Грязнов, В.Н. Охитин // VII Забабахинские научные чтения, 8–12 сентября 2003 г. – 7 с.

75. Динамическое деформирование и разрушение хрупких микроструктурных неоднородных сред / А.М. Брагов [и др.]. // Проблемы прочности и пластичности. – 2012. – вып. 74. – С. 59–67.
76. Махалевич, В.М. Усовершенствование экспериментально-аналитической методики исследования напряженно-деформированного состояния боковой поверхности цилиндрических образцов при осесимметричной осадке / В.М. Махалевич, Ю.В. Добранюк, Е.А. Грай // Наукові праці, ВНТУ. – 2011. – № 4. – С. 1–8.
77. Богомолов, Ю.С. Влияние механических свойств материалов на деформированное состояние цилиндрических образцов при радиальном сжатию./ Ю.С. Богомолов // Известия Томского политехнического института. – 1970. – Т. 167. – С. 61–66.
78. Smith, S.H. Mechanical Response of Solid Cylindrical Conductors to Axial Electrical Currents / S.H. Smith.// Journal of Applied Physics. – Vol. 39, Issue 11. – P. 5268–5274.
79. Colin, J. Axial and radial interface instabilities of copper/tantalum cylindrical conductors / J. Colin, L. Thilly. // Acta mater. – 1999. – Vol. 47, N. 9. – P. 2761–2768.
80. Johanson, L. Longitudinal electrodynamic forces | and their possible technological applications / L. Johanson. // Lund Institute of Technology, 1996. – 61 p.
81. Волков, Н.Б. Скин эффект ионно-звуковая турбулентность и аномальный перенос в неизотермической твердотельной плазме, генерируемой мощным фемтосекундным лазером / Н.Б. Волков // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 6. – С. 40–49.
82. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства): монографиям / О.А. Троицкий [и др.]. – М.: Изд-во АНО ИКИ (Москва – Ижевск), 2004. – Т. I. – 563 с. – Т. II. – 467 с.
83. Троицкий, О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом / О.А. Троицкий.// Известия АН СССР, сер. Металлы. – 1977. – № 6. – С. 118–122.
84. Троицкий, О.А. Электромеханический эффект в металлах / О.А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – № 10. – С. 18–22.
85. Динамическое возбуждение колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсных токов./ О.А. Троицкий [и др.]. // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 1–1. –С. 137–139.
86. Троицкий, О.А. Влияние вибраций от пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию / О.А. Троицкий, В.И. Стащенко, О.Б. Скворцов // Actualscience. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 50–52.
87. Троицкий, О.А. Влияние материала образцов, длительности импульсов и амплитуды тока на величину собственного магнитного поля тока и вибрацию круглых образцов от пинч действия тока / О.А. Троицкий,

- В.И. Сташенко, О.Б. Скворцов.// *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2016. – № 3(317). – С. 187–194.
88. Скворцов, О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments / О.Б. Скворцов // *Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013"*: сборник трудов XII международной научно-практической конференции NIDays-2013, Москва 2013 г. – М.: ДМК-пресс, 2013. – С. 78–80.
89. Савенко, В.С. К расчету плотности тока и напряженности магнитного поля в условиях электропластичности./ В.С. Савенко, О.А. Троицкий, О.Б. Скворцов.// *Инженерно-физические проблемы новой техники: сборник материалов XII Всероссийского семинар-совещания.* – М.: Изд-во НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 274–276.
90. Савенко, В.С. Влияние электропластичности на микроструктуру стали при статической нагрузке / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, О.Б. Скворцов // *Физико-технические науки и образование: проблемы и перспективы исследований.* – Мозырь, УО МГПУ им. И.П. Шамякина, 2016. – С. 128–131.
91. Исследования действия импульсного тока и свч-излучения на механические свойства и фазовый состав нержавеющей стали 12х18н10 т. / О.А. Троицкий [и др.]. // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: сборник научных трудов IV Международной научной конференции.* – Москва: Спектр, 2015. – С. 254–256.
92. Правоторова, Е.А. Оценка статистических характеристик механического действия импульсного тока на модели элементов мощного электрооборудования / Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов // *Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы: материалы Третьей научно-технической конференции.* – Москва, ИМАШ РАН, 2015. – С. 39–40.
93. Правоторова, Е.А. Моделирование виброиспытаний элементов обмоток мощного электрооборудования / Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2015. – № 5. – С. 103–110.
94. Troitskiy, O. A. Generation of mechanical vibrations in metal samples by the use of the pinch effect / O. A. Troitskiy, O. B. Skvortsov, V. I. Stashenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2017. – vol. 218. – P. 1–6.
95. Измерение магнитного поля и вибраций, созданных им в проводниках за счет пинч-эффекта./ О.А. Троицкий [и др.]. // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.* – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 1361–1363.
96. Potapova, A. A. Deformability and structural features of shape memory tini alloys processed by rolling with current / A. A. Potapova, V. V. Stolyarov // *Materials science and engineering: A.* – 2013. – vol. 579. – P. 114–117.

97. Батаронов, И.Л. Механизмы электропластичности / И.Л. Батаронов // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 10. – С. 94–99.
98. Сазонов, Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования / Ю.И. Сазонов // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. – Санкт-Петербург, 2014. – 17 с.
99. Lukyanov, A. Flexural vibrations induced in thin metal wires carrying high currents / A. Lukyanov, S. Molokov // Journal of Physics D-Applied Physics. – 2001. – № 34(10). – P. 1543–1552.
100. Surkaev, L. Magnetohydrodynamic perturbations arising in metallic conductors under the action of the discharge current / L. Surkaev // Technical Physics. – 2015. – vol. 60, № 7. – P. 981–993.
101. Skal, A.S. The full Lorentz force formula reposable for turbulence in solids and fluids and explained Faraday's paradox / A.S. Skal. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – vol. 4, Issue 2. – P. 10–14.
102. Управление параметрами механических колебаний, генерируемых пропусканием импульсного тока через металл / В.И. Стащенко [и др.] // Состояние и проблемы измерений: сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – С. 98–101.
103. Генерирование ударных колебательных процессов в металлических проводниках при пропускании импульсного тока / О.А. Троицкий [и др.] // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник научных трудов: материалы Международной научно-технической конференции. – Москва, МГУ ФТИ, 2017. – Вып. 23 (XXIII). – С. 443–445.

## Глава III. ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

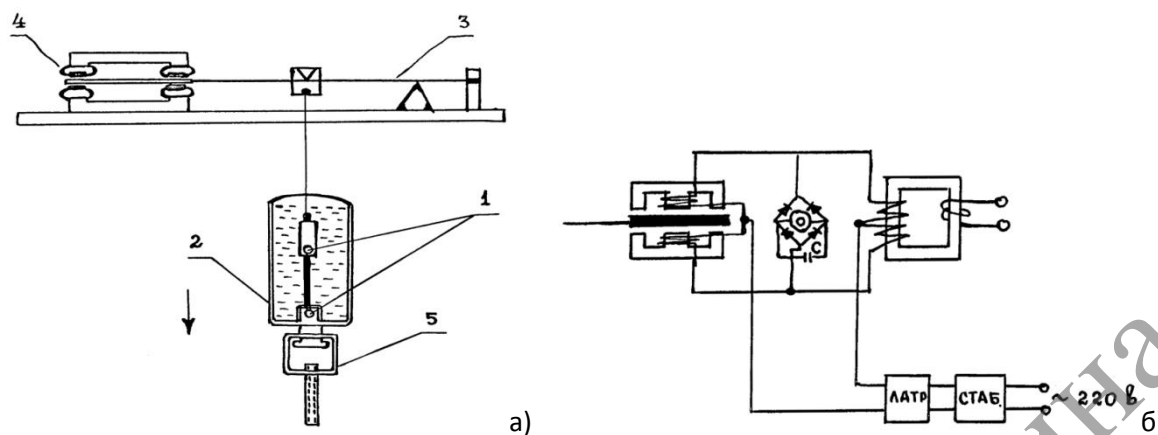
### 3.1. Опытные данные по определению механических напряжений, обусловленных электрон-дислокационным взаимодействием

#### 3.1.1. Релаксация напряжений в условиях действия импульсов тока

В работах Фелтама [1, 2] и Павлова [3] релаксация напряжений объясняется перераспределением и уменьшением максимумов внутренних напряжений в материале под влиянием остаточных деформаций. Остаточные же деформации при достаточно низких температурах объясняются локальными микроскопическими сдвигами в решетке и движением дислокаций. Следовательно, методом релаксации можно изучить закономерности пластической деформации кристаллов при действии электрическим током.

Релаксация механических напряжений [4] измерялась сразу после окончания активного нагружения образцов и дает сведения о пластической деформации металла. Кроме того, в релаксационном процессе дислокации перемещаются с невысокими скоростями  $v_g$  порядка  $10^{-2}$ – $10^1$  см/сек, что равно или меньше дрейфовой скорости электронов  $v_e$ , а для реализации электропластического эффекта (ЭПЭ) должно выполняться условие  $v_e > v_g$ . Поэтому метод релаксации особенно удобен для исследования ЭПЭ. Механизм явления объяснялся, ускорением перемещения дислокаций электронами проводимости. В.Я. Кравченко [5], вычислил ускоряющую силу  $F_e$ , действующую на дислокации со стороны дрейфующих электронов. Условием ускорения дислокаций электронами является превышение скорости дрейфа электронов над скоростью дислокаций. Электронная подсистема металла описывалась приближением свободных электронов, а движение дислокаций – суперпозицией звуковых волн. Электрон-дислокационное взаимодействие приводит к появлению механического напряжения, определяемого формулой  $\tau = F_e/b = V_e J / enb$ . Для напряжения начала работы источников Франка-Рида необходимо напряжение  $\tau_c = 2Gb/\Delta l$ , где  $G$  – модуль сдвига и  $\Delta l$  – длина дислокационного сегмента. Тогда для упрощенной модели [6] при плотностях тока  $J = 10^3$ – $10^5$  А/мм<sup>2</sup> может реализоваться ЭПЭ и деформация, обусловленная только действием тока. На основе сформулированной концепции Рошупкину и Батаронову удалось объяснить основные закономерности и особенности ЭПЭ и ЭПД, получить хорошее согласование с экспериментом [7–9]. Авторами были развиты теоретические представления о роли различных механизмов силового действия электрического тока и электрического поля в интенсификации пластической деформации металлов (ЭПД).

### 3.1.2. Установка для испытания металлических кристаллов растяжением



1 – головки образца; 2 – стакан с охлаждающей жидкостью; 3 – упругий элемент;  
4 – индукционный датчик; 5 – нижний зажим испытательной машины

Рисунок 1. – Схема установки для испытания металлических кристаллов растяжением (а); примененный для измерения усилий деформации индукционный датчик (б)

Использовались две постановки опыта: 1) изменение частоты  $F$  при постоянном значении плотности тока  $J_m$ ; 2) изменение  $F$  при постоянном среднем значении  $J_{cp}$ .

Под влиянием тока измерялись два параметра процесса релаксации: величина релаксированных напряжений  $\Delta\tau$  за время  $t$  и скорость релаксации  $\Delta\tau'$ . Для выделения теплового и пинч-эффекта изменялось направление тока в кристаллах и оценивалась возникающая при этом разница в  $\Delta\tau$  и  $\Delta\tau'$ . Помимо этого, измерялось время задержки  $t$  релаксации напряжений при смене направления тока в кристаллах.

Использовался импульсный ток больших амплитудных значений для получения высоких дрейфовых скоростей электронов проводимости  $v_e = J/(en)$ , где  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация свободных электронов. Импульсный ток имел частоту  $\nu = 100$  Гц, длительность импульсов  $65 \cdot 10^{-6}$  с, амплитудные значения плотности тока  $J_a = 0,4 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup> и средние значения  $J_{cp} = 2,5 \cdot 10^2$  А/см<sup>2</sup>. Основанием для выбора такого режима тока послужило установленное в работах [4, 10] наличие порогового значения плотности тока  $J = 0,4-0,5 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>, при которой начинается микроскопически заметное снижение сопротивления металла деформированию. Кроме того, учитывалось то обстоятельство, что длительности фронта многих естественных деформационных скачков в металлических кристаллах 4–10 мс [5, 7], поэтому частота импульсов тока выбиралась порядка  $\nu = 100$  Гц (при меньшей частоте может иметь место ситуация, когда часть естественных скачков деформации не совпадает по времени с прохождением по кристаллу тока). Длительность импульсов выбиралась небольшой (на 2–3 порядка меньшей, чем временной фронт естественных скачков деформации) с тем, чтобы в образцах не развились тепловые процессы.

Использовались кристаллы цинка, кадмия и свинца чистотой 99,998 %



Zn, 99,9995 % Cd и 99,9995 % Pb, длиной 30 мм и диаметром 1 мм. На кристаллах с помощью электрической спирали наваривались головки и одновременно приваривались медные поводки (диаметром 0,4 мм) для подведения тока. Плотность дислокаций в кристаллах цинка и кадмия составляла  $10^3-10^5 \text{ см}^{-2}$  (пирамидальных и базисных). Плотность дислокаций в кристаллах свинца не контролировалась.

Опыты проводились в жидком азоте. Жесткость динамометра испытательной машины составляла  $K=3,68-10^{-4} \text{ мм/г}$ . Растяжение кристаллов осуществляли со скоростью 0,04 мм/мин ( $2,2-10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ). Паузы релаксации продолжительностью 180 или 360с начинались обычно с момента выключения привода испытательной машины, повторялись при различных уровнях приложенной механической нагрузки по несколько раз на каждом кристалле. Ток пропускался в течение всей деформации, либо только во время пауз релаксации, либо со сменой направления тока на дне релаксационных кривых. Проходящий электрический ток нагревал кристаллы цинка на  $1,8^\circ$ , кадмия на  $1,5^\circ$ , а свинца на  $2,5^\circ$  (измерения проводились с помощью дифференциальных медь-константановых термопар).

На рисунке 2 приведена характерная диаграмма деформации кристалла цинка с участками релаксации напряжений без тока и с током различного направления. Видно, что электрический ток сильно влияет на скорость и на величину  $\Delta\tau$ , увеличивая ее в несколько раз по сравнению с деформацией без тока, а смена направления тока в кристалле при, казалось бы, закончившейся релаксации (горизонтальный участок или дно релаксационной кривой) вызывает вновь релаксацию напряжений.

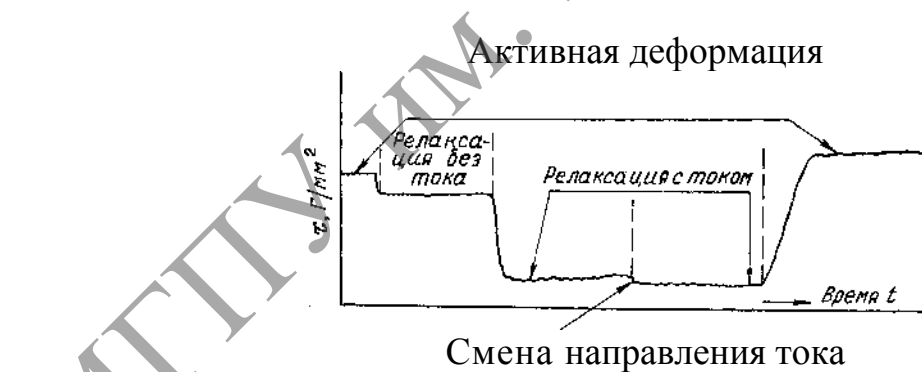


Рисунок 2. – Характерная диаграмма деформации кристалла цинка с участками релаксации с током различного направления и без тока

Изменение величины релаксированных скалывающих напряжений  $\Delta\tau$  на плоскости базиса кристаллов цинка  $\chi_0=22^\circ$  (угол между плоскостью базиса и осью образца) при различной полярности тока в зависимости от числа нагружений до одного и того же уровня нагрузки  $\tau=160 \text{ г/мм}^2$  показан на рисунке 3а. Видно, что релаксация при одной полярности тока с каждым циклом затухает как в случае без тока (пунктирная кривая), а при другой полярности тока – получает развитие (время релаксации опыте

составляло по 180 с). На рисунке 3б отражены результаты эксперимента, когда первые 180 с релаксация протекала при одной полярности тока (нижняя граница заштрихованной области 1), а вторые – при другой (верхняя граница области 1). Были проведены опыты при одной только полярности тока за все 360 с (область 2) или без тока (область 3). По оси абсцисс отложена величина напряжений  $\tau$ , соответствующих началу пауз релаксации, а по оси ординат – релаксированные напряжения  $\Delta\tau$ . Из этих данных видно, что смена направления тока в середине паузы релаксации приводит к дополнительной релаксации. Эффект усиливается с ростом приложенного механического напряжения.

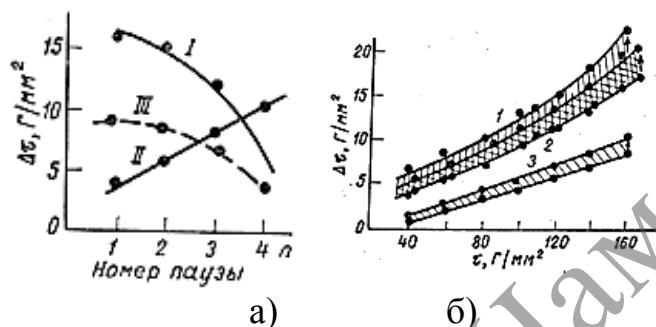


Рисунок 3. – Изменение величины релаксированных напряжений  $\Delta\tau$

Изменение скорости релаксации  $\Delta\dot{\tau}$  в кристаллах цинка без тока и с током различного направления в зависимости от приложенных механических напряжений иллюстрируется рис. 4а.

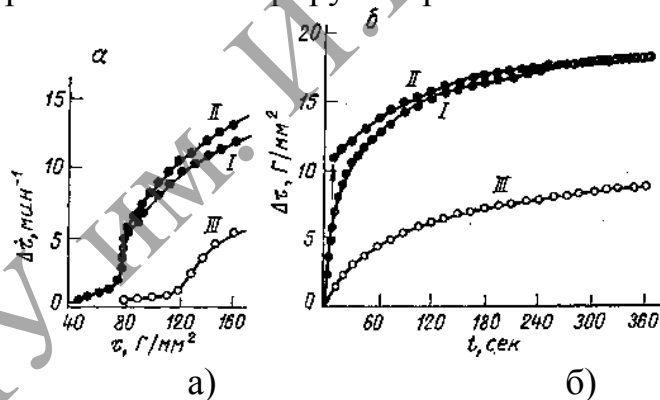


Рисунок 4. – Зависимости скорости релаксаций напряжений  $\Delta\dot{\tau}$  от приложенных напряжений  $\tau$  (а) и релаксированных напряжений  $\Delta\tau$  от времени релаксации  $t_r$  (б): I – с током прямой полярности; II – с током обратной полярности; III – без тока

Видно, что изменение скорости релаксации наибольшее, начиная с некоторого порога механического напряжения (разного для кристаллов с током и без тока). Под влиянием тока не только возрастает скорость релаксации, но происходит также смещение порога механических напряжений (по изгибу кривых), с которых начинается релаксация напряжений, в сторону более низких напряжений на величину примерно  $45 \text{ г/мм}^2$ . На рисунке 4б показано изменение  $\Delta\tau$  с током (кривые I и II) и без тока (кривая III), а также с током разной полярности при переключениях

направления тока, начиная с десятой секунды. Эти данные, как и диаграмма (см. рисунок 4), подтверждают тот факт, что основное изменение скорости релаксации напряжений под влиянием тока происходит в самые начальные этапы релаксации, когда кристалл еще содержит большое число подвижных дислокаций. Как видно из рис. 4б, разность в величине релаксации в кристаллах цинка с током и без тока зависит от величины приложенных напряжений. Глубина релаксационных кривых с током всегда больше на некоторую величину  $\Delta\tau_a$ . Для цинка эта величина составляет примерно  $\Delta\tau_a = 5-7 \text{ Г/мм}^2$  (разность между нижней заштрихованной областью 3 и двумя верхними областями 1 и 2). Это свидетельствует о том, что скачок напряжений  $\Delta\tau_c$ , возникающий при включении тока на любом участке релаксационной кривой, состоит собственно из двух частей  $\Delta\tau = \Delta\tau_a + \Delta\tau_{ac}$  где, помимо  $\Delta\tau_a$ , не изменяющаяся с  $\tau$ , есть еще часть эффекта  $\Delta\tau_{ac}$ , которая растет с  $\tau$  и убывает при увеличении времени с момента начала релаксации (рисунок 4). При изменении направления тока в кристаллах изменяется в основном величина  $\Delta\tau_{ac}$ . Анализ изменения ее дает сведения об ЭПЭ в кристаллах. В первые моменты релаксации  $\Delta\tau_{ac}$  для кристаллов цинка равна  $\sim 10 \text{ Г/мм}^2$ , затем убывает с увеличением времени релаксации (при  $t_p > 10^2 \text{ с}$ ) до нескольких  $\text{Г/мм}^2$ , составляя примерно 40 % от величины релаксации без тока. Аналогичный результат был получен в работе [11] для скачка релаксации  $\Delta\sigma_{ns}$  в свинце при сверхпроводящем переходе:  $\Delta\sigma_{ns}$  также убывало от 10 до  $5 \text{ Г/мм}^2$  при росте времени релаксации  $t_p$  до  $10^3 \text{ с}$ .

Аналогичные результаты были получены на кристаллах кадмия. Как видно из рисунка 5а, переключение тока на второй минуте при суммарном времени релаксации 6 мин (2 + 4) приводит к существенно большему эффекту, чем переключение на четвертой минуте (4 + 2). Как и в случае цинка, было отмечено также затухание релаксации на одной полярности тока и развитие ее на другой полярности. Аналогичные данные были получены при суммарном времени релаксации 20 мин. На рисунке 5б приведена зависимость скорости релаксации  $\Delta\tau'$  от  $\tau$  для кристаллов кадмия, испытанных без тока (кривая 1), и с током одного направления (кривая 2) в случае продолжительности пауз релаксации 6 мин. Видно, что наряду с увеличением скорости релаксации происходит смещение порога начала релаксации в сторону меньших напряжений на величину  $15-20 \text{ Г/мм}^2$ .

Было установлено, что после переключения направления тока в кристалле релаксация возникает не сразу, а после некоторой временной задержки. Как следует из рис. 5в, при переключении тока на десятой секунде (кривая 4') время задержки при  $\tau = 120-135 \text{ Г/мм}^2$  равно примерно 10 с, а на третьей минуте (кривая 1) – 40 с. При этом время задержки  $t_3$  и величина релаксированных напряжений оказываются тем меньшими, чем раньше с момента начала паузы переключается направление тока в кристаллах. С ростом механических напряжений  $\tau$  время задержки  $t_3$  падает.

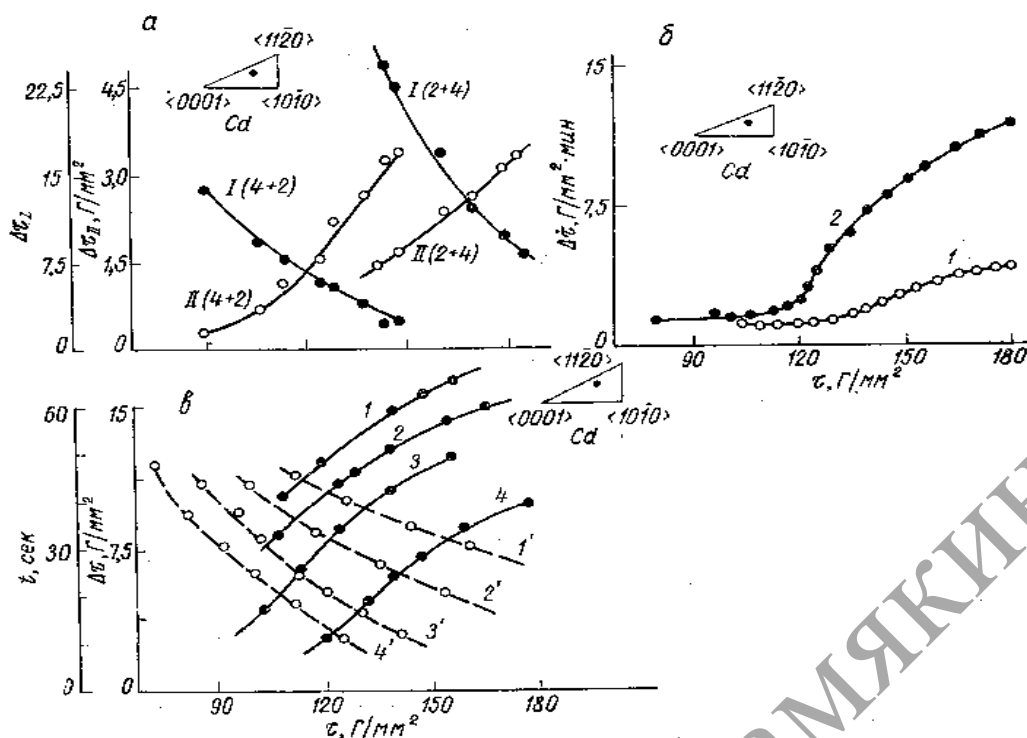


Рисунок 5. – Напряжения релаксации  $\tau_t$  за время 6 мин, скорость релаксации  $t_t$  и время задержки  $t_3$  для кристаллов кадмия при прямой  $\tau_{тI}$  (первой) и обратной  $\tau_{тII}$  (второй) полярности тока в зависимости от напряжения  $\tau$  и времени переключения направления тока: а — на четвертой (4 мин+2 мин) и на второй минутах (2+4), I – прямая, II – обратная полярность тока; б, в – на третьей минуте, I+II (3+3) – кривая 1, на первой минуте, I+II (1 + 5) – кривая 2, на двадцатой секунде, I+II (20с+5 мин 40с) – кривая 3 и на десятой секунде I + II (10с +5 мин 50с) – кривая 4

При первом включении тока на дне релаксационных кривых в результате действия всех механизмов тока – теплового, пондеромоторного и ЭПЭ возникает сильная релаксация напряжений, что указывает на наличие в кристалле большого числа мест, где эффективное приложенное напряжение  $\tau_a$  вызывает перемещение дислокаций и дополнительную релаксацию. Можно назвать две причины этого явления. Во-первых, под влиянием тока происходит ослабление сил связи между дислокациями и термически непреодолимыми барьерами, то есть происходит упорядочение в расположении дислокаций. Вторая возможная причина заключается в том, что под влиянием тока легко протекают процессы зарождения и размножения дислокаций, иначе говоря, увеличивается плотность подвижных дислокаций  $\rho$ . Такое предположение иногда высказывают и в отношении влияния сверхпроводящего перехода на релаксацию приложенных напряжений в металле [10].

Таким образом, при первом включении тока действует первый и, возможно, второй механизмы, а при переключении направления тока (второе включение тока) действует только первый механизм. При этом происходит лишь перегруппировка дислокаций перед термически непреодолимыми стопорами. Часть из стопоров становится преодолимой при смене направления электронного ветра в кристалле, поскольку при этом частично увеличивается эффективное приложенное напряжение.

В настоящей работе показано, что под действием тока происходит сильная дополнительная релаксация и эффект убывает с увеличением времени  $t_v$ , что также подтверждает динамическую теорию. Вместе с тем, как было сказано выше, картина, возможно, осложняется влиянием тока (при первом включении) на работу источников дислокаций.

Как и в случае кадмия, операция переключения напряжения тока в кристаллах после определенного времени задержки  $t_3$  (которое уменьшалось с ростом  $\sigma$ ) приводила к дополнительной релаксации напряжений. Это видно из сравнения кривых, обозначенных  $I+II$  (3 мин + 3 мин) и  $I$  (6 мин), характеризующих релаксацию со сменой направления тока в середине паузы релаксации и при одной полярности тока.

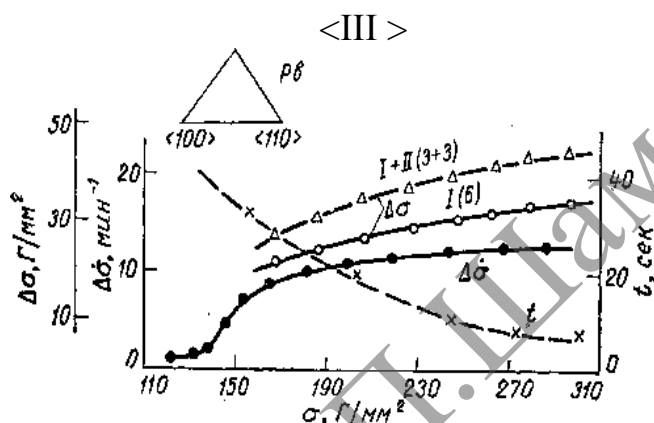


Рисунок 6. – Зависимость времени задержки  $t_3$  (пунктирная кривая), релаксированных напряжений  $\Delta\sigma$  и скорости релаксации  $\Delta\sigma'$  от приложенных напряжений  $\sigma$  для кристаллов свинца

На рис. 6 приведены данные для кристаллов свинца. Установленное изменение релаксации напряжений в кристаллах цинка, кадмия и свинца, наиболее вероятно, обусловлено наличием электрон-дислокационного взаимодействия и влиянием его на пластическую деформацию металла, то есть влиянием собственно ЭПЭ. Из приведенных данных видно, что смена направления тока в кристаллах во время испытаний приводит к дополнительной релаксации. Это нельзя объяснить, на наш взгляд, тривиальными механизмами действия тока, так как эффект Джоуля и пинч-эффект неполярны.

Электрический ток сильно влияет на релаксацию механических напряжений в металле — происходит увеличение скорости релаксации, смещается порог начала релаксации и увеличивается глубина релаксационных кривых. Причиной облегчения деформации является участие самого электронного газа в пластической деформации металла, когда он из пассивной и тормозящей среды превращается в среду, имеющую направленный дрейф (снижающую в обычном понимании электронное торможение дислокаций).

В обычных условиях деформации электроны поглощают фононы, порожденные дислокацией. В случае же электрического тока для части

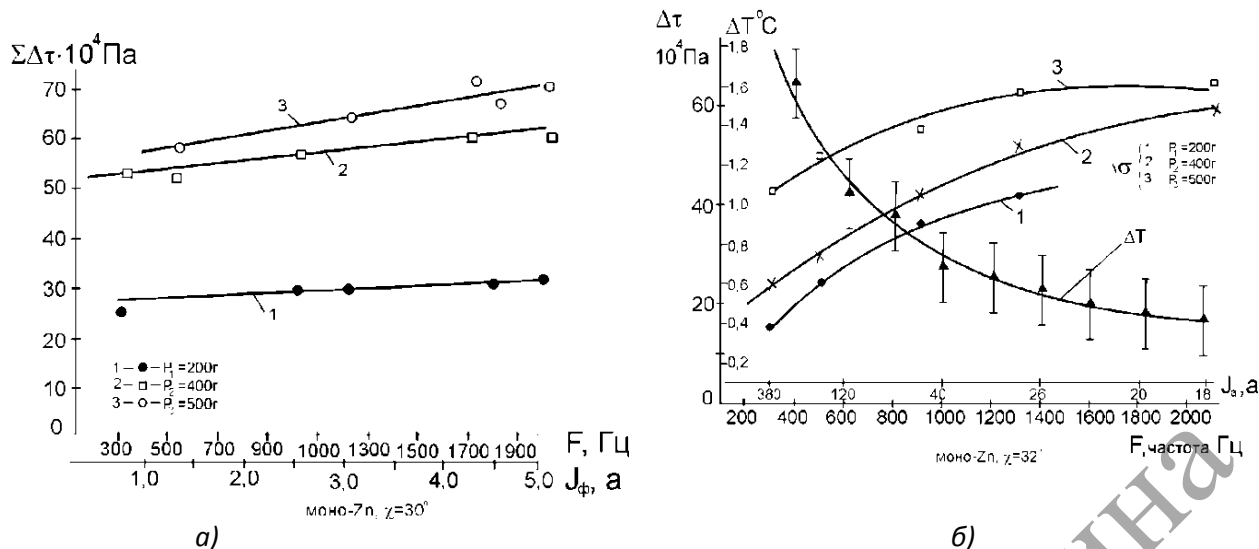
электронов, причем тем большей, чем больше плотность тока в металле, поглощение фононов сменяется их испусканием (преимущественно в области ядра дислокаций), а электронное торможение сменяется электронным ускорением. Согласно [12], коэффициент электронного взаимодействия с дислокациями  $B_{en}$  равен  $B_{en}=bnp_F$ . Он зависит от концентрации свободных электронов  $n$  и величины фермиевского импульса  $p_F$ , поэтому для силы ускорения  $F$  получается выражение  $F=B_{en}Vg=brippVg$ , в которое входят параметры не только электронного газа ( $n$  и  $p_F$ ), но и дислокаций ( $b$  и  $v_g$ ).

При электропластической деформации металла механизм пластической деформации металла остается термоактивационным. Об этом свидетельствуют наличие и характер изменения времени задержки  $t_3$  релаксации напряжений при сменах направления тока в кристаллах, а также зависимость  $\Delta\tau$  от  $\tau$  и от  $T$  (по данным [13]), свойственные термически активируемым процессам. Фактор тока, таким образом, в механизме ЭПЭ эквивалентен по своему действию появлению в кристалле дополнительного эффективного напряжения  $\Delta\tau_{ac}$ .

Таким образом, релаксация механических напряжений  $\Delta\tau$  (под влиянием тока) в кристаллах Zn, Cd и Pb состоит из двух частей:  $\Delta\tau=\Delta\tau_a+\Delta'\tau_{ac}$ . Первая  $\Delta\tau_a$  – обусловлена понижением дна релаксационных кривых. Она слабо зависит от приложенных напряжений  $\tau$  и объясняется действием всех факторов тока: теплового, пондеромоторного и электрон-дислокационного взаимодействия. Вторая  $\Delta\tau_{ac}$  зависит от направления тока в кристаллах, приложенных напряжений и времени переключения направления тока. Она объясняется преимущественно электрон-дислокационным взаимодействием.

### 3.1.3. Зависимости эффекта от частоты следования импульсов

При изучении зависимости эффекта от частоты следования импульсов  $F$  методом релаксации напряжением длительность импульсов сохранялась постоянной и равной  $\tau_u = 0,9 \cdot 10^{-4}$  сек. Как следует из рис. 7а, в первой постановке эксперимента при  $J_m = 30$  А/мм<sup>2</sup> имеет место некоторое усиление эффекта действия тока с ростом  $F$ . Малая величина эффекта объясняется небольшими значениями амплитудной плотности тока  $J_m$ . На рисунке 7б приведена зависимость  $\Delta\tau$  (суммарные релаксированные напряжения) от  $F$  во второй постановке опытов, когда сохранялась постоянной средняя величина плотности тока  $J_{cp} = 3$  А/мм<sup>2</sup>. Видно, что с ростом  $F$  действие тока усиливается. На том же графике показано, что ход зависимости изменения температуры образцов  $\Delta T$  с ростом  $F$  является обратным ходу зависимости  $\Delta\tau = f(F)$ , что указывает на несущественность тепловых эффектов в этом опыте.



**Рисунок 7. – Влияние частоты импульсного тока на релаксацию напряжений в кристаллах цинка при постоянном амплитудном значении плотности тока  $I_a=3 \cdot 10^3$  а/см<sup>2</sup> (а) и постоянном среднем значении плотности тока  $I_{cp}=300$  а/см<sup>2</sup> (б). На последнем графике показано также изменение температуры кристаллов**

### 3.1.4. Выводы

1. В результате действия тока в металлических кристаллах возрастает скорость релаксации механических напряжений, смещается порог начала релаксации в сторону низких напряжений на десятки процентов и увеличивается глубина релаксационных кривых.

2. При сменах направления тока в кристаллах изменяется величина релаксированных напряжений. Обнаружено наличие времени задержки релаксации после переключения направления тока в кристаллах.

3. Величина релаксированных под влиянием тока напряжений состоит из двух частей:  $\Delta\tau = \Delta\tau_a + \Delta\tau_{ac}$ , одна из которых обусловлена понижением дна релаксационной кривой ( $\Delta\tau_a$ ), а другая – перегруппировкой дислокаций –  $\Delta\tau_{ac}$ . Вторая часть зависит от направления тока в кристалле, от приложенных напряжений  $\tau$  и от времени релаксации  $t_p$ .

## 3.2. Испытания кристаллов на ползучесть при одновременном действии током

### 3.2.1. Особенности испытаний кристаллов на ползучесть

Механические испытания ползучестью образцов осуществляются под постоянным приложенным напряжением. Различают три стадии ползучести: 1 – неустановившаяся, с постоянным уменьшением скорости течения; 2 – установившаяся, имеющая постоянную скорость течения; 3 – заключительная стадия с возрастающей скоростью течения, с разрушением образца. При низких и средних температурах (ниже  $0,5T_{пл}$ ) ползучесть практически полностью определяется движением и размножением дислокаций. Неустановившаяся ползучесть объясняется либо

уменьшением плотности подвижных дислокаций, либо ростом внутренних напряжений, приводящих к уменьшению скорости движения дислокаций [13]. Первое может происходить за счет постепенного сокращения действующих источников дислокаций. В основе теории истощения [14,15] лежат представления о наличии в кристаллах  $N$  источников дислокаций, либо дислокационных сегментов, которые могут срабатывать только один раз.

В работах [16-20] получены зависимости  $\varepsilon(t_n)$  и  $\varepsilon(I_m)$ , измеренные при постоянстве одного из параметров ( $t_n$  или  $I_m$ ), входящих в величину  $I_m t_u$ . Было показано, что пластическая деформация металла с увеличением интенсивности импульсного воздействия резко возрастает, имея пороговый характер. Наличие порога, видимо, свидетельствует о начале безактивационной пластической деформации при данном  $I_m t_u$ , которой предшествует проработка образца током в течение  $t_0$ . При сохранении прочих равных условий с увеличением  $I_m t_u$  уменьшается время задержки  $t_3$  ( $t_3=t_0$ ). Время уменьшается и при увеличении деформирующего напряжения.

В процессе ползучести кристаллов цинка определялись механические напряжения, вызванные импульсами тока при постоянной амплитудной плотности тока и разной их длительности. Использовали кристаллы цинка (99,998% Zn) длиной 50 мм и диаметром  $\sim 1$  мм с углом между плоскостью базиса (0001) и осью образца  $\chi=24\text{—}28^\circ$ . Кристаллы\* испытывали методом ползучести при одновременном пропускании по ним импульсного и переменного тока либо без тока. Опыты проводились в жидком азоте. Электрический ток подводился к образцам с помощью медных проводов диаметром 0,4 мм, сваренных в их головки. До начала эксперимента образцы проходили двухчасовой отжиг при  $400^\circ\text{C}$  в атмосфере аргона. Амплитудная плотность импульсного тока  $J_m$  сохранялась постоянной и равной  $200 \text{ A/мм}^2$ , частота  $\nu=100 \text{ гц}$ , а длительность импульсов  $t_m$  изменялась в пределах от 50 до 150 мксек. При указанных режимах возникал нагрев образцов относительно окружающего азота на  $1,1\text{—}1,5^\circ$ .

### 3.2.2. Частотная зависимость электропластического эффекта

Частотная зависимость эффекта была изучена также с использованием испытаний кристаллов ползучестью. Она имеет следующие методические особенности. Временная зависимость деформации ползучестью на неустановившейся стадии хорошо описывается логарифмическим законом  $\varepsilon = \alpha \cdot \ln(\gamma t + 1)$ . Для случая  $\gamma t \gg 1$  этот закон принимает вид  $\varepsilon = A + \alpha \ln t$ , где  $A = \alpha \ln \gamma$ ,  $\alpha$  и  $\gamma$  – константы. В основе теории [21,22] лежит представление о ползучести как о процессе истощения. В кристалле имеется  $N$  источников дислокаций (возможно, дислокационных сегментов), которые могут срабатывать один раз. Если  $\tau_c$  – напряжение, необходимое для безактивационного срабатывания источника, то между  $\tau_c$  и  $(\tau_c + d\tau_c)$



срабатывает какое-то число источников  $N(\tau_c)$ . При этом в каждом случае дислокациями замечается площадь  $A(\tau_c)$ . Вид функции  $N(\tau_c)$  и  $A(\tau_c)$  зависит от конкретных условий деформации и особенностей дислокационной структуры. Энергия активации для срабатывания источника записывается в виде  $\Delta H = \Delta U_0(\tau_c) - \Delta W(\tau)$ , где  $\Delta U(\tau_c)$  – высота энергетического барьера источника;  $\Delta W(\tau)$  – работа внешнего напряжения. Вероятность срабатывания при напряжении  $\tau$  записывается в виде  $\Gamma = \nu \exp\left[-\frac{\Delta H(\tau, \tau_c)}{kT}\right]$ .

Дислокации, испущенные всеми источниками, вызовут деформацию  $b \cdot A \cdot (\tau_c) \cdot V^{-1}$ , где  $V$  – объем, в котором находятся источники. В итоге возникнет деформация со скоростью  $\varepsilon = -b \int_{\tau_c}^{\infty} N \cdot A \cdot e^{-\Gamma t} d\tau_c$ .

Теория истощения может быть использована для анализа влияния тока на процесс ползучести металлических кристаллов, но необходимо знать конкретный вид функции  $\Delta H(\tau, \tau_c)$ . Как было показано рядом автором,  $\Delta H(\tau, \tau_c)$  может быть представлена в виде

$$\Delta H(\tau, \tau_c) = \Delta U(\tau_c) \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau_c}\right)^n.$$

При  $n = 1$  ползучесть описывается логарифмическим законом. Такому закону подчиняется, в частности, ползучесть цинка при 78°K [23].

Конкретным микроскопическим процессом, который определяет скорость ползучести кристаллов цинка при этих температурах и дает  $n = 1$ , является преодоление скользящими дислокациями леса других дислокаций в других плоскостях скольжения. Этот механизм является основным не только для кристаллов цинка, но и для других плотноупакованных металлов. Энергия активации записывается в виде

$$H(\tau, \tau_c) = \frac{Gb^3}{2\pi} - lb^2(\tau - \tau_a).$$

Таким образом,  $\Delta U = \frac{Gb^3}{2\pi}$  и  $\tau_c = \frac{Gb}{2\pi l}$ .

Коэффициент  $\alpha$ , входящий в выражение для логарифмической ползучести, определяется как  $\alpha = t \varepsilon$  или, согласно теории [22], как

$$\alpha = \left(\frac{2\pi k T \tau}{Gb^2}\right) N(\tau) A(\tau).$$

Отсюда видно, что  $\alpha$  зависит от числа источников  $N(\tau)$  и от площади  $A(\tau)$ , замечаемой дислокациями, испущенными источниками. Электрический ток вызывает, наиболее вероятно, увеличение  $N(\tau)$ , например, числа тех сегментов дислокаций, которые действуют как источники. Через указанный параметр ток может приводить к росту  $\alpha$ .

Однако возможно и другое объяснение механизма действия тока, связанное с изменением скорости движения дислокаций  $v$  и изменением числа подвижных дислокаций  $N$ . Если воспользоваться известным уравнением для скорости пластического течения  $\varepsilon = bNv$  и предположить, что  $N$  в процессе ползучести на первой ее стадии убывает, то из логарифмического закона следует соотношение

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{kT}\right),$$

а также

$$\varepsilon = N_0 b v \exp\left(-\frac{\lambda\varepsilon}{kT}\right),$$

где  $N_0$  – плотность подвижных дислокаций после нагружения кристалла и  $\lambda$  – коэффициент. Изменение дислокационной структуры материала сопровождается ростом его внутренних напряжений по закону:

$$\tau_a = \tau_a^0 + \alpha(\varepsilon - \varepsilon_H),$$

где  $\tau_a^0$  и  $\varepsilon_H$  – начальные значение внутренних напряжений и деформаций (в момент приложения нагрузки) и  $\alpha$  – коэффициент упрочнения. Подстановка значений  $\tau_a$  в выражение для термоактивируемой пластической деформации дает

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left\{-\left[\Delta U - V^*(\tau - \tau_a^0) + \alpha V^*(\varepsilon - \varepsilon_H)\right]/kT\right\}$$

или при  $\alpha$  и  $\tau = \text{const}$  (последнее по условиям испытаний) после интегрирования приведенного уравнения получается

$$\varepsilon = \varepsilon_H + \alpha \ln(\gamma t + 1),$$

где

$$\alpha = \frac{kT}{\alpha V^*} \text{ и } \gamma = \frac{\alpha V^*}{kT} \varepsilon_0 \exp\left[-\frac{\Delta U - V^*(\tau - \tau_0)}{kT}\right].$$

Наибольший интерес представляет анализ возможного изменения коэффициента  $\alpha$ , поскольку в рассматриваемых теориях этот коэффициент зависит от напряжений, а электрический ток эквивалентен приложению к кристаллам дополнительных эффективных напряжений. Зависимость  $\alpha$  от  $\tau$  определяется зависимостью от  $\tau$  активационного объема  $V^*$  и коэффициента  $\alpha$ . Наиболее сильно с  $\tau$  изменяется  $V^*$ . Это было видно из опытов с релаксацией напряжений и известно из литературы [24]. Кроме того  $\alpha$  (в основном, входящий в него коэффициент  $\alpha$ ) зависит от температуры, увеличиваясь пропорционально  $T$ . Наконец, из зависимости энергии активации  $\Delta U$  от  $\tau^*$  при экстраполяции кривых к  $\tau^* = 0$  можно получить величину энергетических барьеров  $\Delta U$ , преодолеваемых дислокациями.

Если справедливо предположение, что включение тока эквивалентно приложению к кристаллу дополнительных эффективных напряжений  $\delta\tau^*(t, J_m, F)$ , зависящих от основных параметров импульсного тока  $t, J_m, F$ , то общее эффективное напряжение  $\tau^*$  должно быть записано в виде

$$\tau^* = \tau_0^* + \delta\tau_c^*(t, J_m, F),$$

где  $\tau_0^*$  и  $\tau^*$  – напряжения до и после включения тока.

Как будет показано дальше, величина эффекта усиливается с ростом каждого параметра импульсного тока, но не сразу, а начиная с некоторого порогового значения  $J_m$ ,  $t_n$  и  $F$ . Если считать, что величина активационного объема  $V^*$  в области предела текучести  $\tau_c$  постоянна (что, вообще говоря, может быть и не справедливым при  $\tau < \tau_c$  и  $\tau > \tau_c$ ), то  $\Delta\tau_n^*$  можно находить по формуле  $\Delta\tau_n^* = C \ln \frac{\dot{\epsilon}_n}{\dot{\epsilon}}$ , где  $\dot{\epsilon}$  и  $\dot{\epsilon}_0$  – скорости ползучести при действии соответственно импульсным током и при эквивалентном нагреве, а  $C = \frac{kT}{V}$

Для других значений тока получается  $\Delta\tau_1^* = C \ln \frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_{01}}$  и т.д. Опыт показывает, что  $\dot{\epsilon}_{0n} = \dot{\epsilon}_{01}$ , поэтому можно принять  $\dot{\epsilon}_{0n} = \dot{\epsilon}_{01} = \dot{\epsilon}_0$  (при  $\dot{\epsilon}_0 \ll \dot{\epsilon}_1$ ). Определяя зависимость  $\Delta\tau^* = f\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$  для различных режимов тока, можно получить, например, график зависимости  $\Delta\tau^* = f(F)$  при  $J_m = \text{const}$ .

На рисунке 8 представлена установка для испытания образцов на ползучесть. При изучении частотной зависимости эффекта использовались три режима тока:

A –  $J_m = 150 \text{ А/мм}^2$  и  $t_n = 1,2 \cdot 10^{-4}$  сек с изменением частоты  $F$  от 2 до 600 Гц;

B –  $J_m = 200 \text{ А/мм}^2$  и  $t_n = 1,2 \cdot 10^{-4}$  сек с изменением частоты  $F$  от 2 до 400 Гц;

C –  $J_m = 300 \text{ А/мм}^2$  и  $t_n = 1,2 \cdot 10^{-4}$  сек с изменением частоты  $F$  от 2 до 200 Гц.

Опыты проводились при  $78^\circ\text{K}$  на кристаллах цинка (99,998% Zn) длиной 50 мм и диаметром  $\sim 1$  мм. Необходимые механические напряжения достигались не сразу, а ступенчатым нагружением кристаллов с шагом по  $4-6 \cdot 10^4$  Па. С момента последней догрузки кривая ползучести записывалась в течение 10–12 мин. Кривые ползучести снимались последовательно в режимах без тока, при эквивалентном нагреве и с импульсным током. Перед включением переменного и импульсного тока производилась догрузка кристаллов на  $3-4 \cdot 10^4$  Па. Ориентация кристаллов была равна  $\chi_0 = 24^\circ-26^\circ$ , степень нагретости кристаллов определялась двумя способами: 1) с помощью дифференциальных медь-константовых термопар; 2) по тепловым удлинениям образцов  $\Delta l$  при  $\tau < \tau_0$  и максимальной чувствительности регистрирующей системы (с помощью механо-электрического датчика Э-2Д1). В последнем случае степень нагретости определялась по формуле

$\Delta T = \frac{\Delta l}{\alpha l_0}$ , где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения образцов и  $l_0$  – исходная длина образцов.

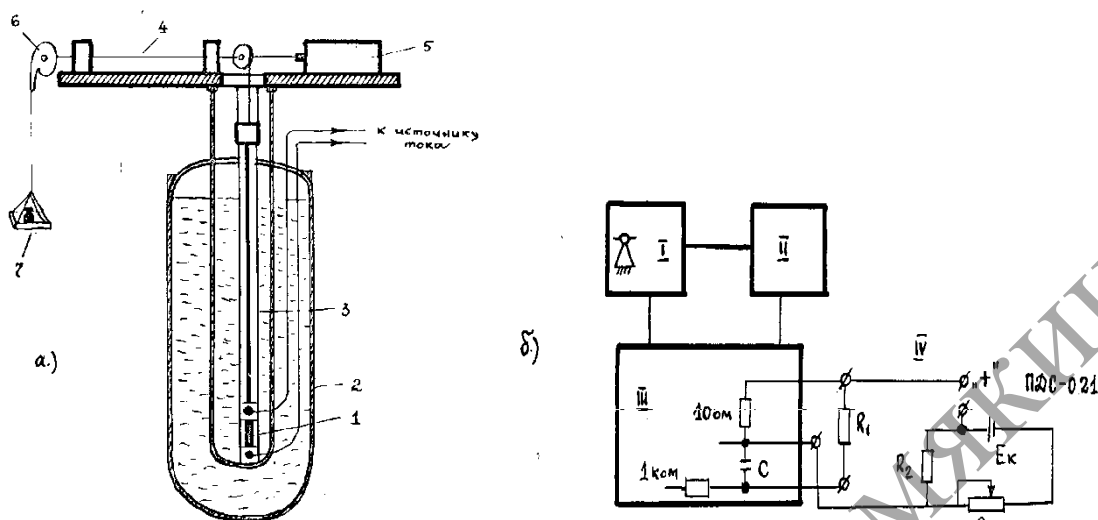


Рисунок 8. – Установка для испытания образцов на ползучесть при одновременном действии током (а); система регистрации и записи деформации (б). 1 – образец; 2 – дьюар с жидким азотом; 3 – держатель образца; 4 – ось; 5 – электрический блок; 6 – эвольвента; 7 – груз

На рисунке 9а приведены результаты испытаний образцов по всем трем режимам. Точки на графиках являются средними арифметическими значениями измеренных величин деформаций 8–10 образцов. Относительная ошибка измерений составляла 1–1,5 % (при деформации без тока и эквивалентном нагреве) и 8–10 % (при деформации с импульсным током). Кривая 1 получена без тока, кривые 2 – при эквивалентном нагреве. Кривые 3, 4 и 5 – при действии импульсным током для режимов А, В и С (за одну, три и десять минут). Из приведенных данных видно, что с увеличением частоты следования импульсов наступает насыщение эффекта.

На рисунке 10а приведены кривые логарифмической ползучести для режима А. Видно, что логарифмический закон ползучести сохраняется при всех режимах, но в случае действия импульсного тока наклон графиков наибольший. Влияние эквивалентного нагрева показано заштрихованной областью 2.

На рисунке 10б показано изменение параметра  $\alpha$ , входящего в закон логарифмической ползучести для использованных режимов тока. Видно, что параметр  $\alpha$  возрастает с ростом частоты тока. Эквивалентный нагрев существенно не влияет на параметр  $\alpha$  (кривая 2), что видно при сравнении с кривой 1, характеризующей деформацию без тока.

На рисунке 11а приведена зависимость коэффициентов упрочнения  $\varepsilon$  от частоты тока  $F$  для режимов А, В и С. Видно, что в результате действия тока происходит резкое уменьшение  $\varepsilon$  (кривые 3, 4 и 5), в тем большей степени, чем больше  $F$  и  $J_m$ .

Как указывалось выше, действие импульсного тока эквивалентно приложению к кристаллам дополнительных эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$ . На рисунке 11б представлены зависимости  $\Delta\tau(F)$  для режима А ( $J_m = 150 \text{ А/мм}^2$ ) – кривая 1; для режима В ( $J_m = 200 \text{ А/мм}^2$ ) – кривая 1 и для режима С ( $J_m = 300 \text{ А/мм}^2$ ) – кривая 3. Видно, что характер зависимостей одинаков:  $\Delta\tau$  слабо изменяется с частотой  $F$  после значений  $\Delta\tau$  примерно  $10^4 \text{ Па}$  для режимов А и В, а для режима С – после значений  $\Delta\tau = 4,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$ . До этого происходит рост  $\Delta\tau$  с частотой тока. Увеличение  $J_m$  приводит к смещению зависимостей  $\Delta\tau^*(F)$  в сторону больших значений  $\Delta\tau^*$ .

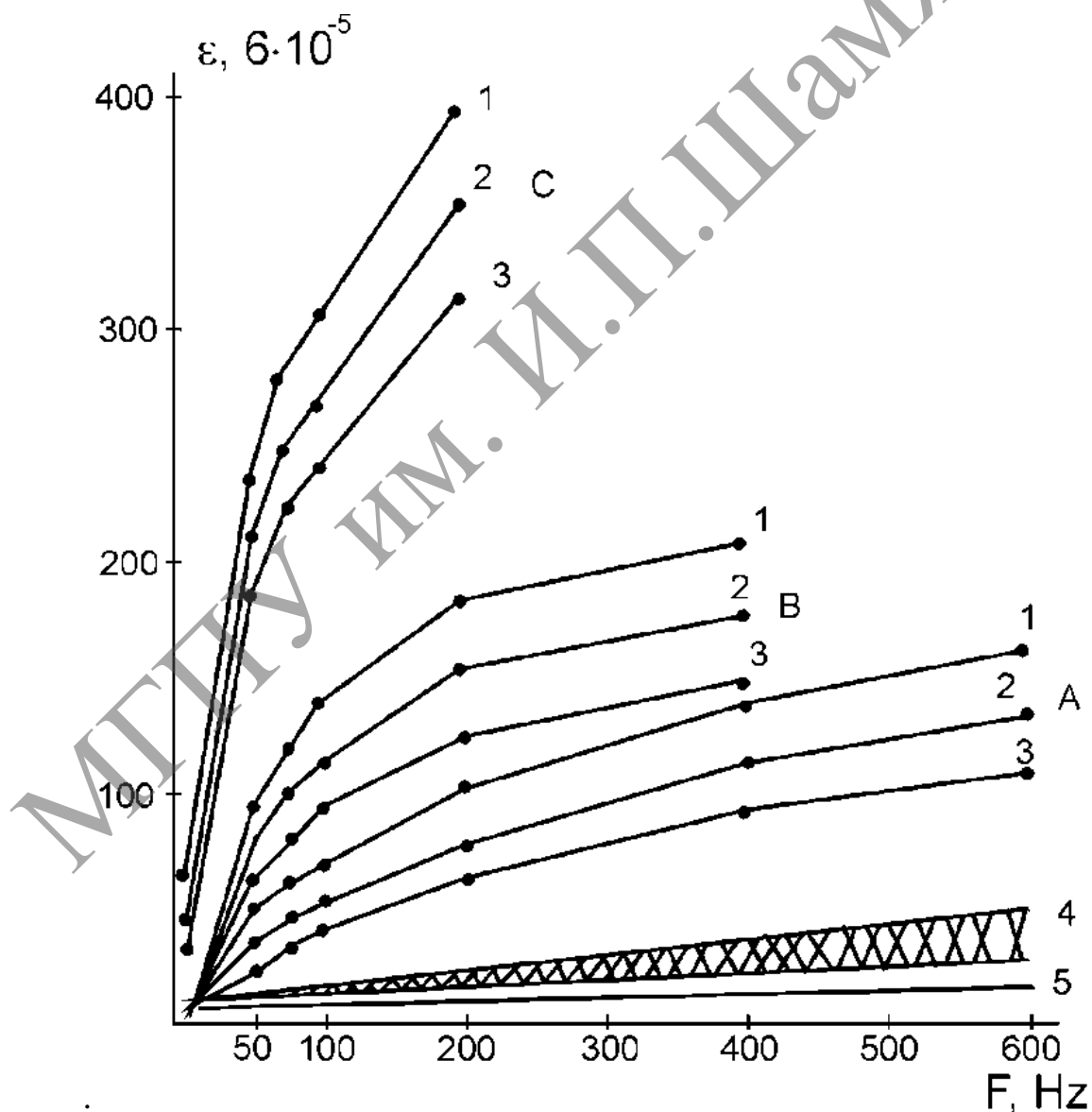


Рисунок 9а. – Зависимость деформации ползучестью от частоты импульсного тока  $F$  для режимов А, В и С

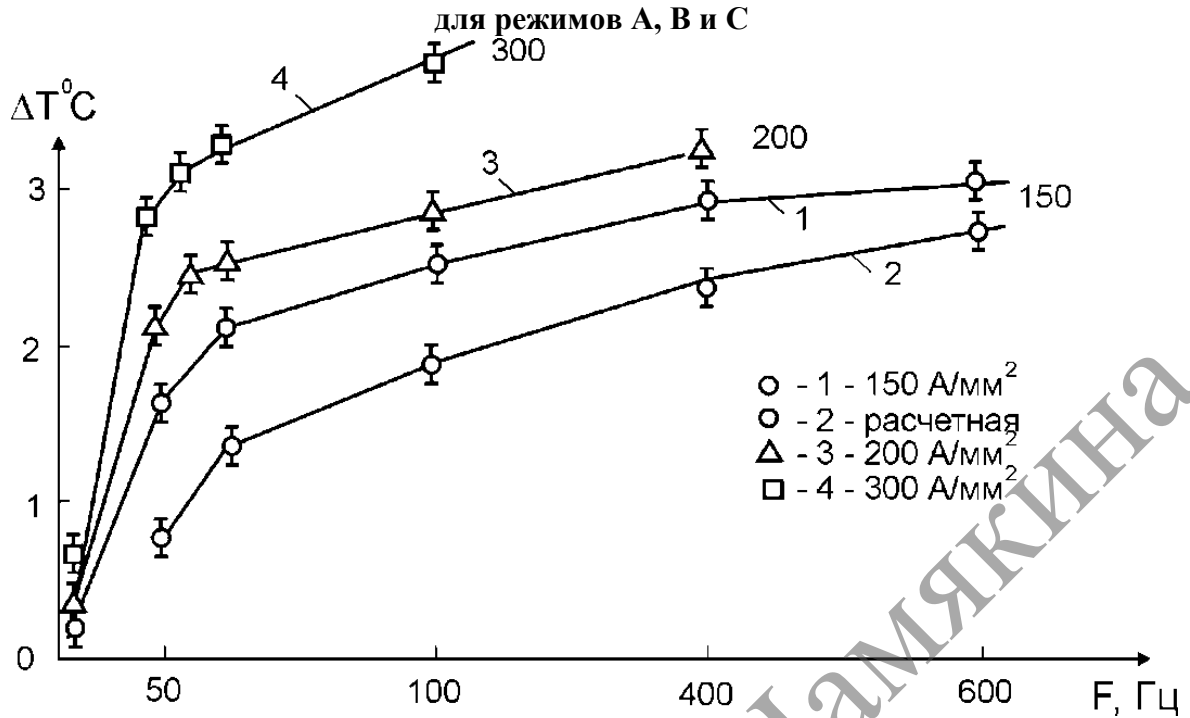


Рисунок 9б. – Изменение температуры кристаллов цинка относительно жидкого азота в зависимости от частоты импульсного тока  $F$  для режимов А (1, 2); В (3) и С (4) по данным измерений с помощью термопар (кривые 1, 3 и 4) и по расчету на основе измеренных дилатационных пиков

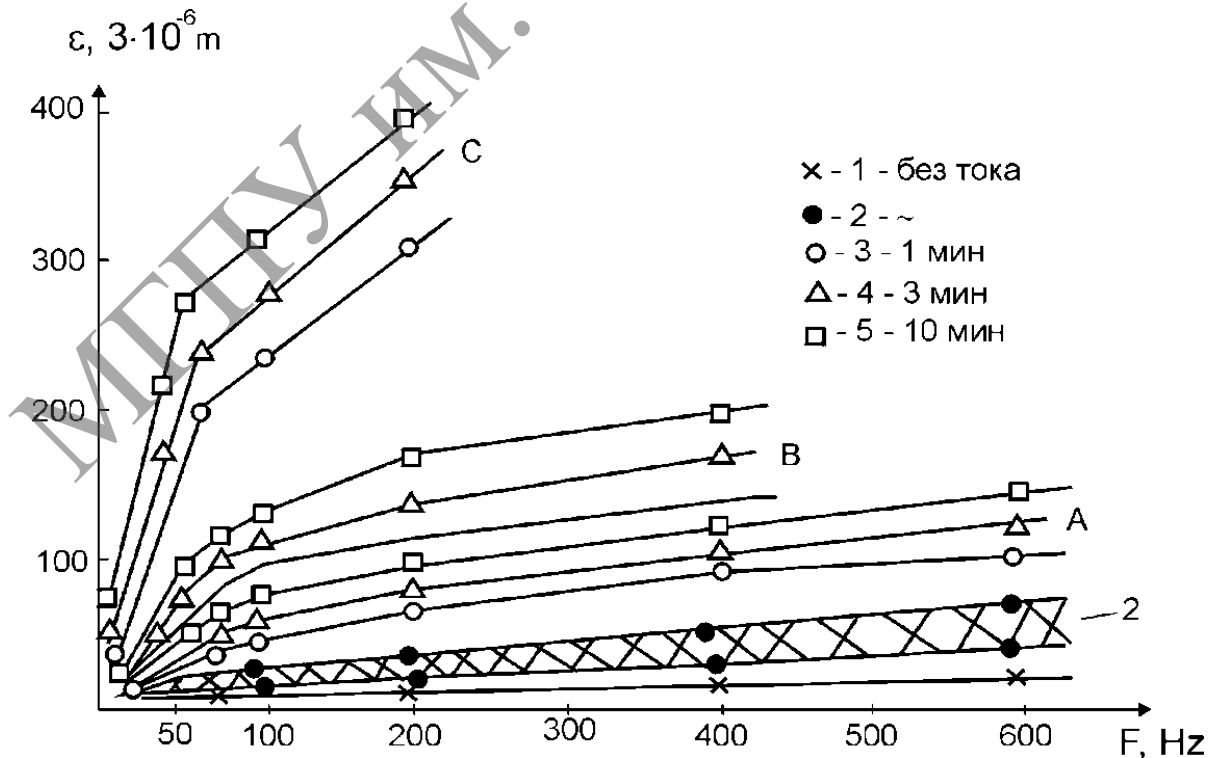


Рисунок 10а. – Зависимость деформации ползучестью от частоты импульсного тока F для режимов А, В и С

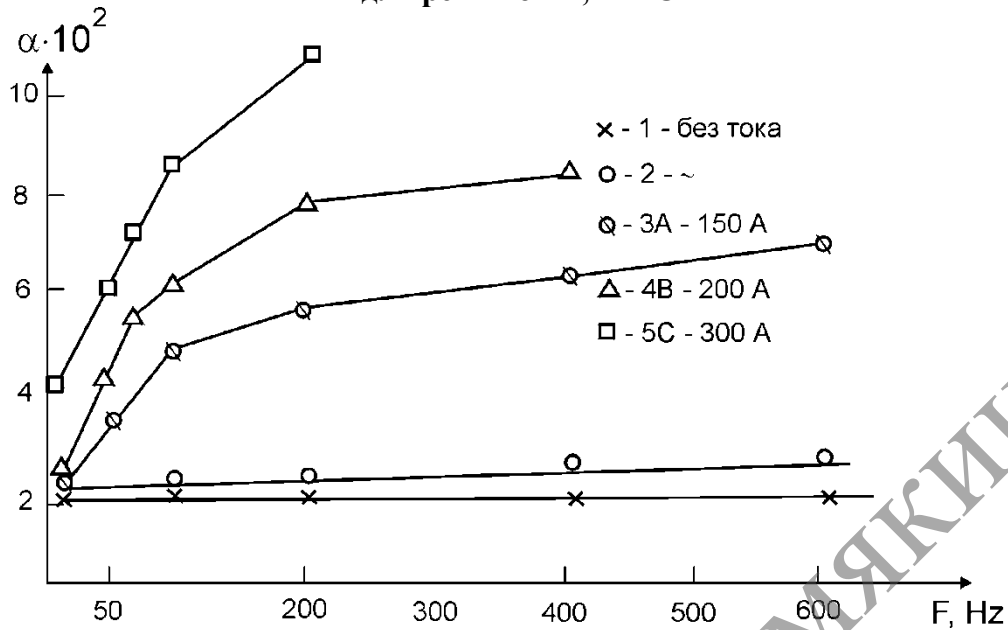


Рисунок 10б. – Зависимость параметра α, входящего в закон логарифмической ползучести, от частоты импульсного тока F

Касаясь объяснения этих результатов, отметим, что при определенных значениях  $J_m$  и  $t_n$  частота импульсного тока  $F$  влияет на величину ЭПЭ как фактор, задающий частоту попыток дислокационных сегментов преодолевать свои препятствия в плоскости скольжения. Увеличение же  $J_m$  ведет к отрыву тех сегментов, для которых эффективные напряжения становятся больше критических. Этим можно объяснить увеличение  $\Delta\tau^*$  с частотой тока и увеличение пороговых значений  $\Delta\tau^*$  на рис. 1.6.6.б с ростом  $J_m$ .

Обнаруженное значительное увеличение параметра  $\alpha$  можно объяснить в рамках теории истощения [22]  $\alpha = \frac{2\pi k \Gamma \tau^*}{Gb^2} N(\tau_c) A(\tau_c)$  как ростом эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$ , так и увеличением числа действующих источников дислокаций  $N(\tau_c)$ , в качестве которых выступают закрепленные по концам дислокационные сегменты. Это ведет к увеличению числа подвижных дислокаций.

Из формулы Б.Ф. Фикса  $F = Je \left(1 - \frac{v_d}{v_e}\right) \frac{\Delta\rho_d}{N_d} n$  и косвенно из формулы

В.Я. Кравченко  $F \approx \frac{b}{4} \left(\frac{v_e}{v_d} - 1\right) \frac{v_d}{v_F} \frac{\partial n}{\partial \mu} \Delta^2$  следует, что величина ЭПЭ линейно

зависит от плотности тока  $J$ . Такой же характер зависимости от  $J$  имеют

напряжения  $\sigma(J) = \frac{J}{e} m \tilde{v}_F$ , создаваемые током на источниках дислокаций.

Нами было установлено, что при растяжении кристаллов с постоянной скоростью, а также при испытаниях их ползучестью под постоянными приложенными напряжениями ЭПЭ начинается не сразу, а по достижении плотностью тока  $J_m$  некоторых пороговых значений, равных  $1,5 \cdot 10^4 - 4,0 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$  в зависимости от режима деформации и вида напряженного состояния кристаллов. При указанных значениях  $J_m$  и диаметре образцов  $\sim 1 \text{ мм}$  пондеромоторный эффект мал ( $\leq 10^3 \text{ Па}$ ), и его можно не учитывать. Тепловой эффект для кристаллов, испытываемых в жидком азоте при времени действия одного импульса  $t_{\text{и}} = 10^{-4} \text{ сек}$ , также мал ( $0,1-0,2^\circ$ ). Поэтому можно считать, что в выбранных условиях эксперимента ток оказывает в основном электронно-пластическое действие. Ранее было показано, что при испытаниях кристаллов растяжением с постоянной скоростью величина эффекта линейно зависит от  $J_m$ . В случае испытаний ползучестью использовались два режима: А –  $J_m = 50 - 900 \text{ A/mm}^2$  при  $F = 2 \text{ Гц}$  и  $\tau_{\text{и}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$  и В –  $J_m = 50 - 500 \text{ A/mm}^2$  при  $F = 100 \text{ Гц}$  и  $\tau_{\text{и}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ . В случае режима А пороговые значения тока находятся в области  $250 \text{ A/mm}^2$  (рисунок 2.12.а). Коэффициент упрочнения  $\alpha$  уменьшается в тем большей степени, чем больше  $J_m$ .

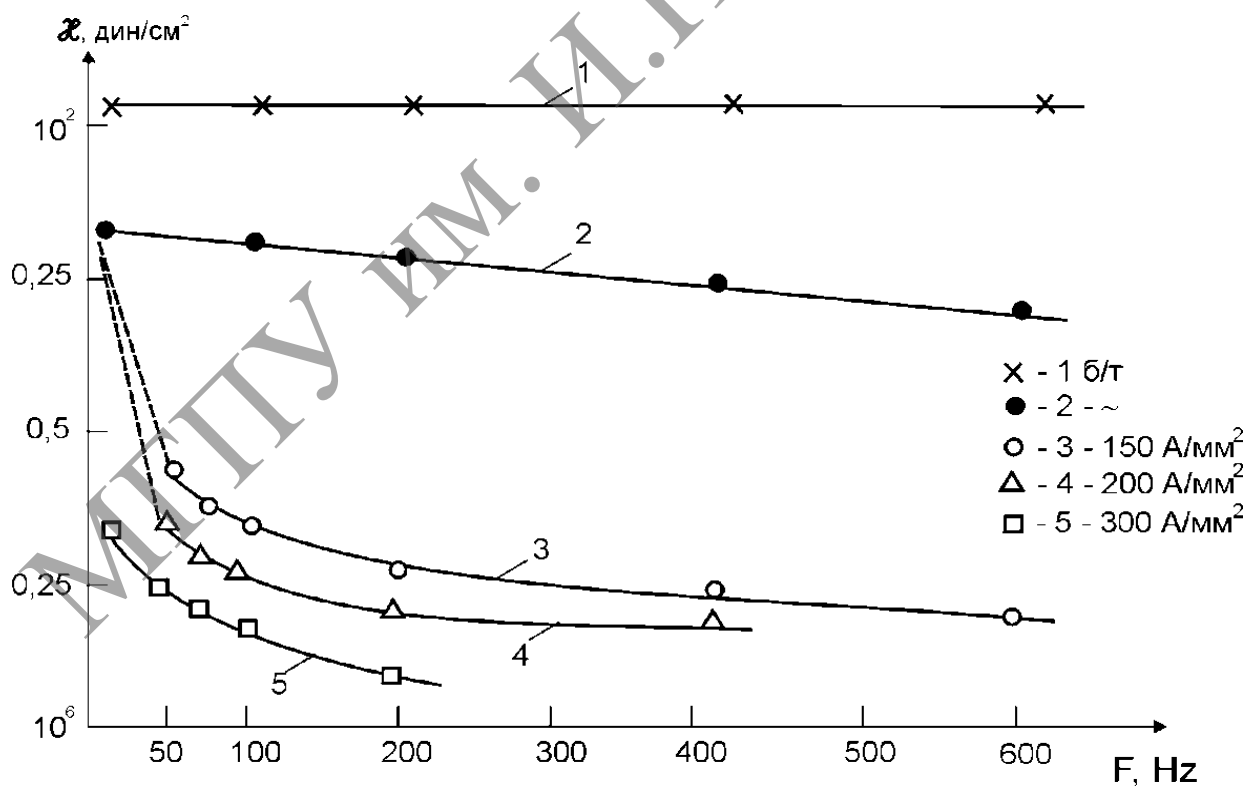


Рисунок 11а. – Зависимость коэффициента упрочнения  $\alpha$  от частоты импульсного тока  $F$  для режимов А (3); В (4) и С (5). Кривая 2 – при эквивалентном нагреве



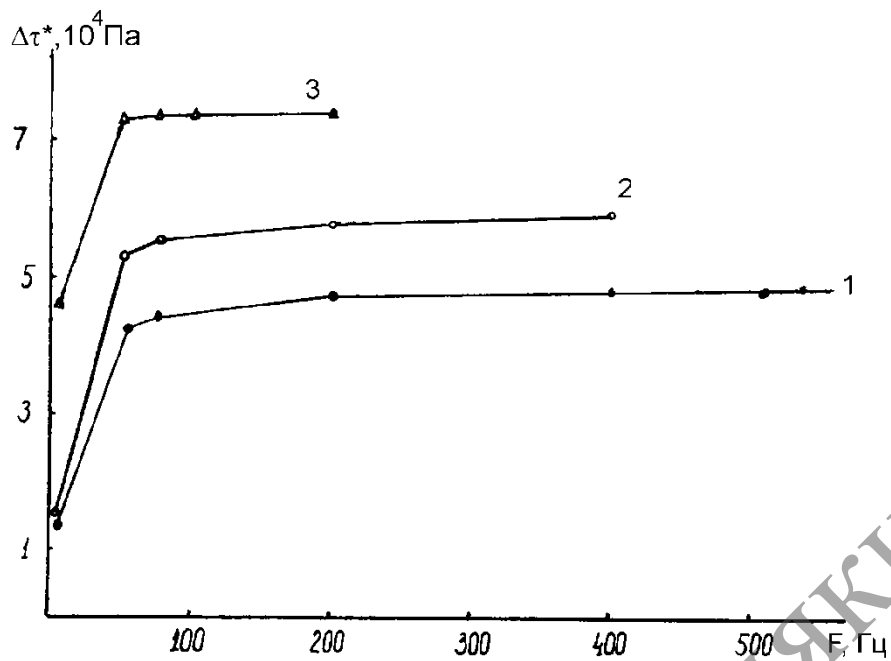


Рисунок 116. – Зависимость изменений эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$  от частоты импульсного тока 1 –  $J=150 \text{ A/mm}^2$ ; 2 –  $J=200 \text{ A/mm}^2$ ; 3 –  $J=300 \text{ A/mm}^2$

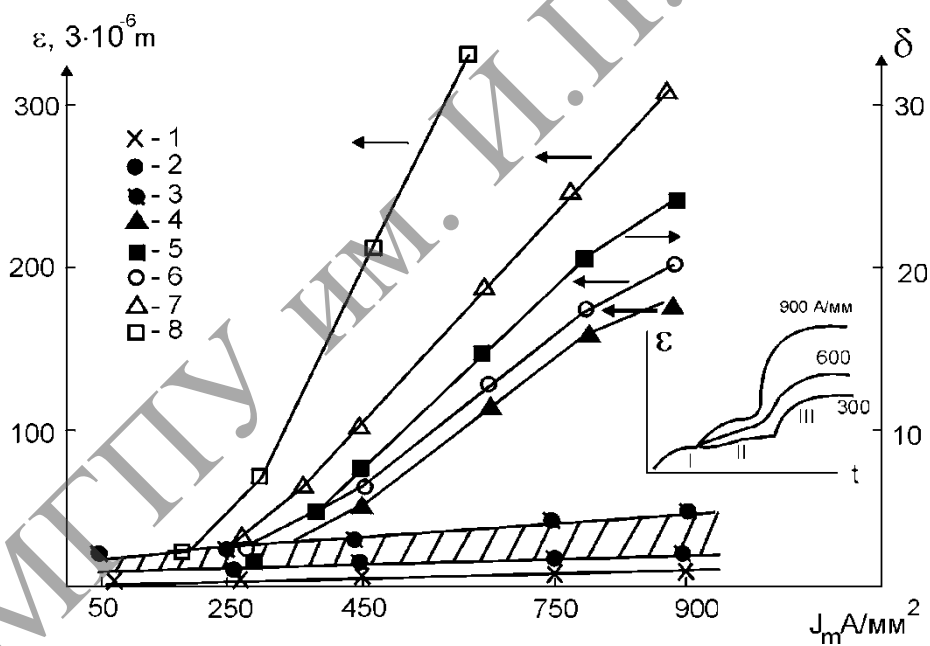


Рисунок 12а. – Зависимость деформации ползучестью от плотности импульсного тока  $J_m$  при  $\tau_u=120 \text{ мкс}$  и  $F=2 \text{ гц}$ . На вмонтированном графике – характерные кривые деформации в зависимости от времени ползучести

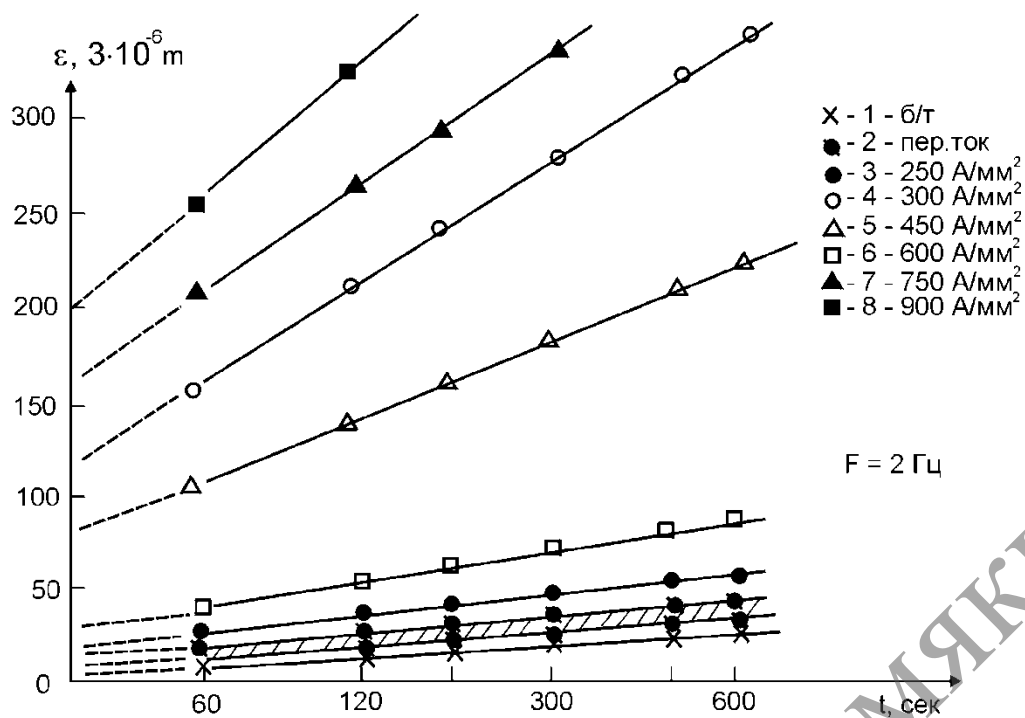


Рисунок 126. – Логарифмическая ползучесть кристаллов цинка при различных плотностях импульсного тока  $J_m$  А/мм<sup>2</sup> и частоте следования импульсов  $F=2$  гц

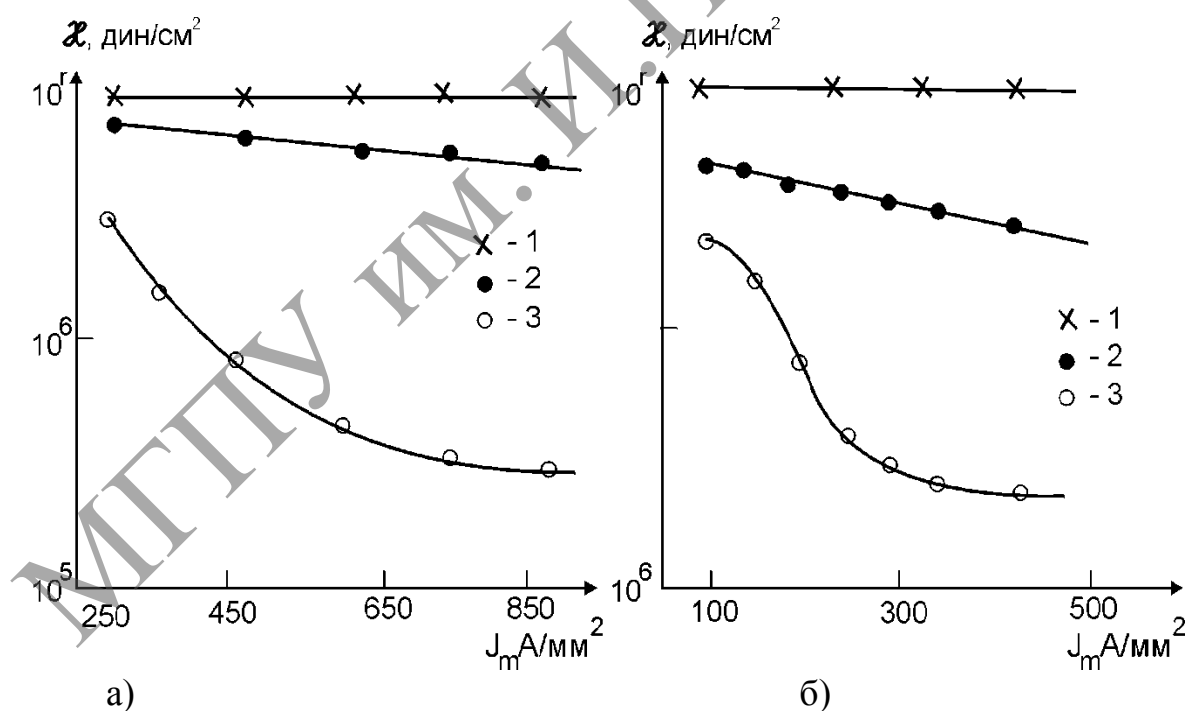


Рисунок 13а, б. – Изменение коэффициента упрочнения  $\alpha$  в зависимости от  $J_m$  при  $\tau_u=120$  мкс и  $F=2$  гц (кривая 3). При эквивалентном нагреве – кривая 2. Без тока – кривая 1. б) То же самое при  $F=100$  гц

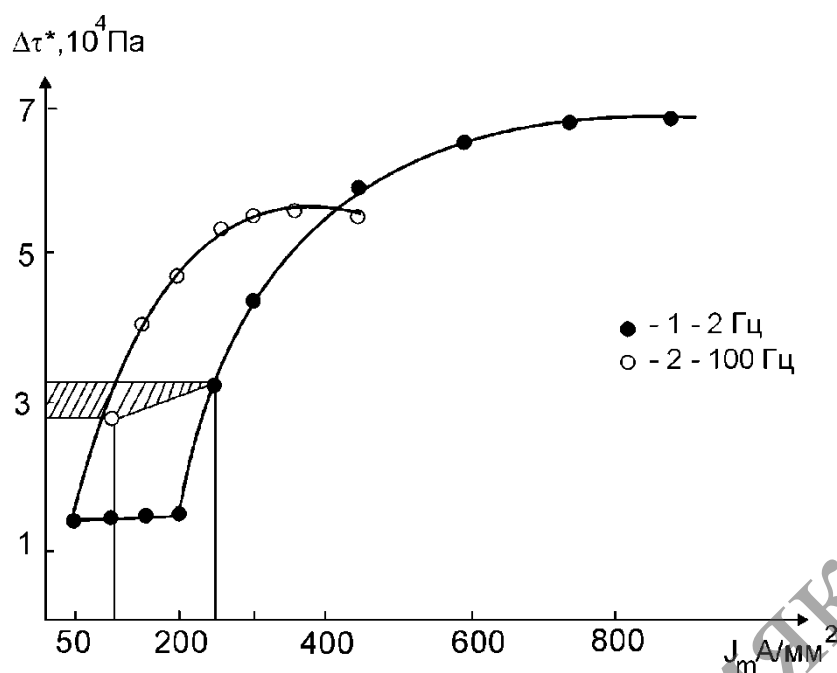


Рисунок 13в. – Изменение эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$ , создаваемых импульсным током, в зависимости от плотности тока  $J_m$  для режимов А (1) и В (2) Пороговым значениям  $J_m$  как в режиме А, так и в режиме В отвечает одно и то же значение  $\Delta\tau = 3 \cdot 10^4$  Па (показано на рисунке в на оси ординат)

По расчетам при  $J_m = 250$  А/мм<sup>2</sup>, когда ЭПЭ получает уже развитие, пондеромоторный эффект мал по величине. Как указывалось, в радиальном направлении возникает напряжение величиной лишь  $\sim 10^3$  Па. С ростом  $J_m$  роль этого побочного эффекта возрастает (по квадратичному закону), и при  $J_m = 900$  А/мм<sup>2</sup> пинч-эффект равен уже  $1,3 \cdot 10^4$  Па. Это может быть причиной наблюдаемых сложных зависимостей параметров пластической деформации от  $J_m$ .

Можно было ожидать, что с увеличением длительности импульсов  $\tau_u$  возрастет эффект действия тока, поскольку этот параметр определяет продолжительность электрон-дислокационного взаимодействия. Примерно пропорционально  $\tau_u$  изменяется импульс дислокационной структуры под влиянием проходящего по кристаллу тока. Однако величина его сложным образом зависит от  $\tau_u$ , т.к. простая зависимость могла бы иметь место при надбарьерном движении дислокаций, что редко реализуется в эксперименте.

Роль фактора  $\tau_u$  понятна также в рамках термофлуктуационной теории. Если среднее время ожидания дислокаций перед препятствиями представить

в виде  $t_1 = \int_0^{\infty} tP(t)dt$ , где  $P(t)$  – плотность вероятности активации, то при

$t_1 \ll \tau_u$  для двух одинаковых групп подвижных дислокаций разного знака дополнительная деформация в разных плоскостях скольжения, а также дополнительная релаксация будет

$$\delta\tau = \Delta\tau(J) - \Delta\tau(J=0) = \frac{kT}{V^*} \cdot \frac{x^2 + 1}{x},$$

где  $x = \exp\left(\frac{\delta U}{kT}\right)$  и  $\delta U$  – изменение энергии активации под действием силы  $F_e$

и  $V^*$  – активационный объем. Тогда при рассмотрении в общем виде получается зависимость ЭПЭ от  $\tau_u$ . Кроме этого эффективность действия импульсного тока зависит от  $\tau_u$  через значение среднего тока  $J_{cp}$ , куда входит  $\tau_u$ , а именно

$$\Delta\tau \sim \frac{F_e}{b} \sim \frac{J_{cp}}{enb} = \frac{J_m \tau_u F k}{enb}.$$

При изучении зависимости эффекта от  $\tau_u$  методом релаксации напряжений частота  $F$  и амплитудная плотность тока  $J_m$  сохранялись постоянными и равными 100 Гц и 250 А/мм<sup>2</sup>. Форма импульсов была прямоугольной без обратных выбросов. Тепловой эффект составлял 0,7°–1,5° (увеличение температуры происходило с ростом  $\tau_u$ ). Пондеромоторный эффект был мал и, что самое главное, оставался в том опыте постоянным, т.к.  $J_m$  не изменялись.

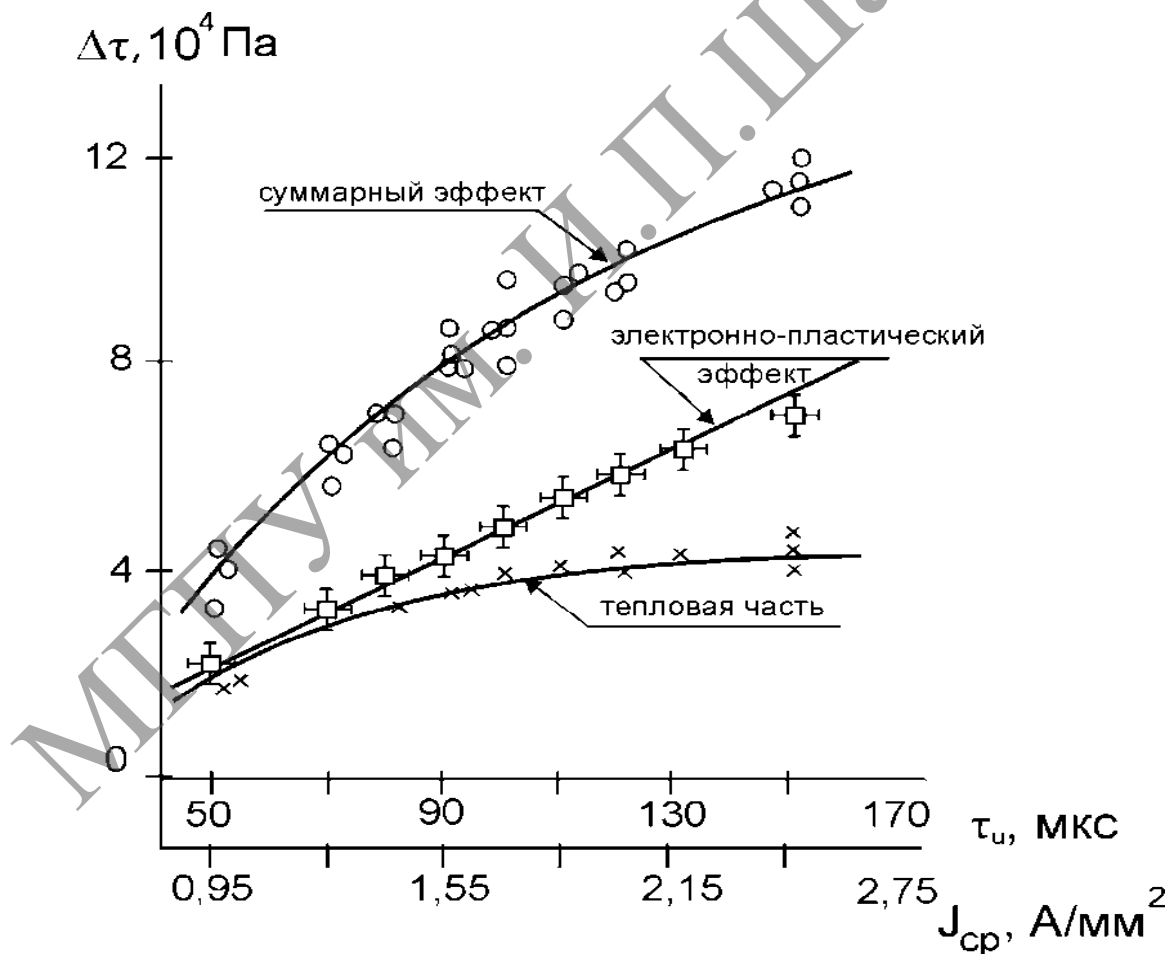


Рисунок 14а. – Зависимость релаксированных напряжений  $\Delta\tau$  от длительности импульсов тока  $\tau_u$  и величины средней плотности тока  $J$

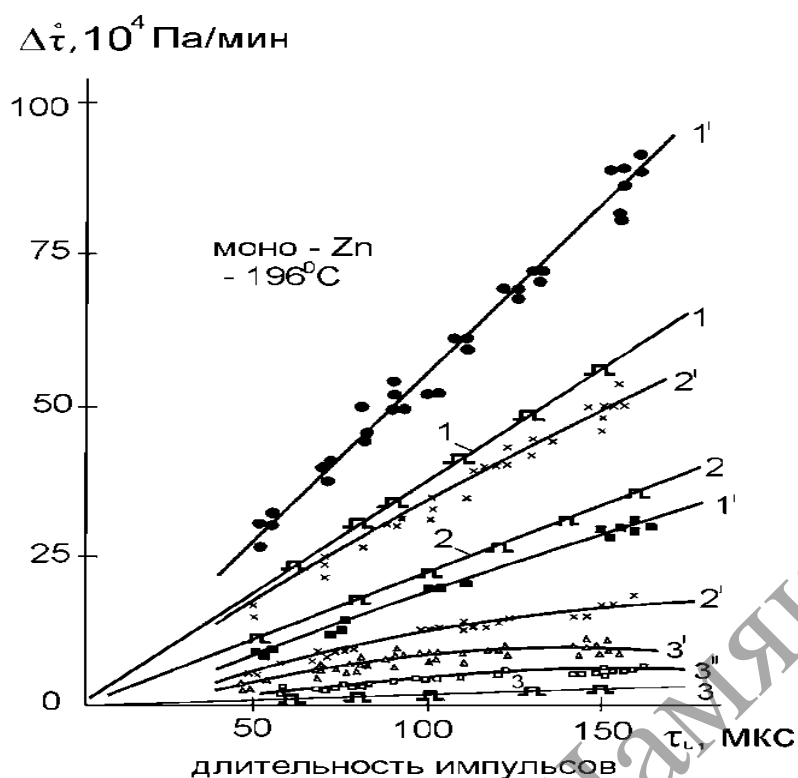


Рисунок 14б. – Зависимость скорости релаксации  $\Delta\tau$  за первые 5 сек (кривые 1, 1' и 1''), 30 сек (кривые 2, 2' и 2'') и 60 сек (кривые 3, 3' и 3'') от длительности импульсов тока  $\tau_{и}$ . 1', 2' и 3' – импульсный ток; 1'', 2'' и 3'' – переменный ток; 1, 2 и 3 – ЭПЭ

На рисунке 14а приведена зависимость релаксированных напряжений  $\Delta\tau$  от величины  $\tau_{и}$  и средней плотности тока  $J_{ср}$ . Видно, что с ростом  $\tau_{и}$  суммарное действие тока усиливается пропорционально  $\tau_{и}$  (примерно в три раза).

На рисунке 14б приведена зависимость скоростей релаксации  $\Delta\dot{\tau}$  за время 5 сек (кривые 1', 1'' и 1), 30 сек (кривые 2', 2'' и 2) и 60 сек (кривые 3', 3'' и 3) для суммарного действия тока (кривые 1', 2' и 3'), теплового действия (кривые 1'', 2'' и 3'') и для ЭПЭ (кривые 1, 2 и 3). Видно, что наибольшее действие тока по механизму ЭПЭ имеет место в первые секунды после начала релаксации, когда в кристалле имеется большое число подвижных релаксаций. Если в первые 5 сек  $\Delta\dot{\tau}$  при  $\tau_{и} = 150$  мкс составляет  $5-6 \cdot 10^5$  Па, то к 30 сек она падает до  $3-3,5 \cdot 10^5$  Па, а к концу первой минуты составляет уже лишь  $3-4 \cdot 10^4$  Па в минуту. Скорость релаксации  $\Delta\dot{\tau}$ , обусловленная ЭПЭ, увеличивается с ростом  $\tau_{и}$ . Все три кривые (1, 2 и 3) хорошо экстраполируются к нулевому значению  $\Delta\dot{\tau}$  с уменьшением  $\tau_{и}$  до нуля.

При изучении зависимости ЭПЭ от  $\tau_{и}$  методом ползучести кривые ползучести, как и прежде, снимались последовательно в режимах без тока, при эквивалентном нагреве и с импульсом тока. Это показано вмонтированным графиком на рисунке 15а. Длительность импульсов  $\tau_{и}$  изменялась от 30 мкс до 240 мкс. При этом плотность  $J_m$  и частота  $F$  тока сохранялись постоянными и равными  $250 \text{ А/мм}^2$  и 100 Гц. Как и прежде,

пинч-эффект был слабым и не изменялся на протяжении всего эксперимента. Величина теплового эффекта показана на рис. 15б. Оценки производились по тепловым удлинениям образцов  $\Delta l$  с расчетом по формуле  $\Delta T'' = \frac{\Delta l}{\alpha l_0}$

(где  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$  1/град), а также с помощью медь-константовых термопар. На рисунке 15б вмонтированы также дилатационные пики при включении ( $J_1, J_2$  и  $J_3$ ) и выключении ( $J=0$ ) переменного тока, создающего эквивалентный нагрев.

На рис. 15а приведена зависимость деформации ползучестью  $\Delta \epsilon$  от длительности импульсов тока  $t_n$ . Кривая 1 характеризует действие тока за первые 5 мин, кривые 2 и 3 – за 1 мин и 30 сек. Видно, что, начиная примерно с  $t_n = 110-120$  мкс, происходит усиление эффекта с ростом  $t_n$ . В этом эксперименте было подтверждено, что деформация ползучестью начинается не сразу, а по истечении некоторого времени задержки  $t_3$  после включения тока (второй малый график на рисунке 15а). Зависимость  $t_3$  в логарифмических координатах от величины догрузки  $\Delta t$  имеет линейный характер. Это свидетельствует в пользу термофлуктуационного механизма влияния параметра  $t_3$ .

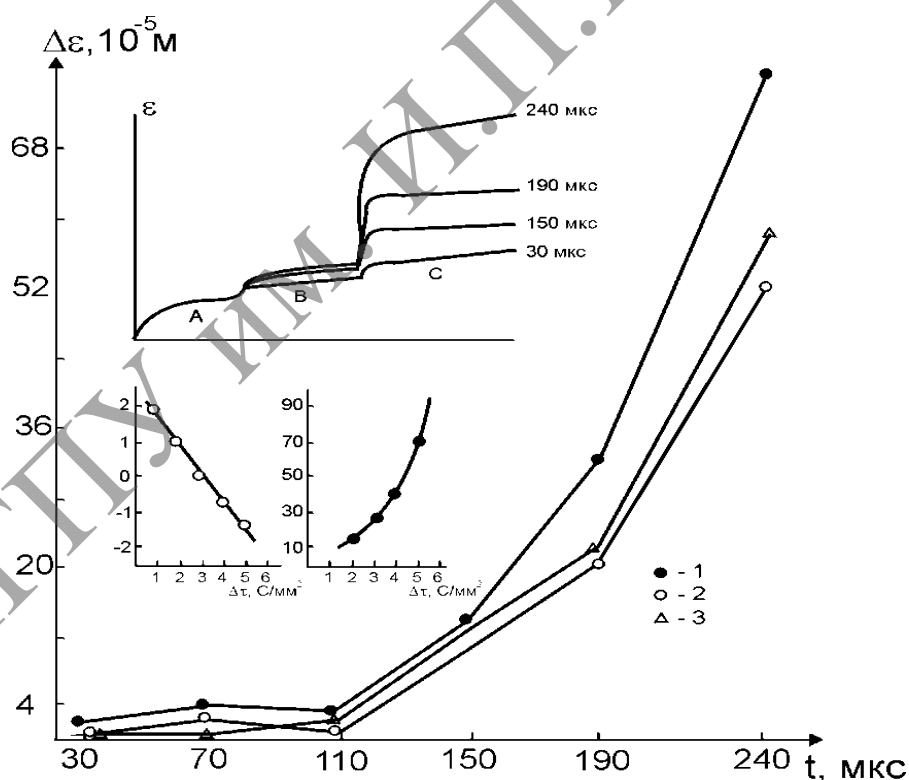


Рисунок 15а. – Выделенная от теплового действия тока деформация ползучестью кристаллов цинка за время 5 мин (1), 1 мин (2) и 30 сек (3) в зависимости от длительности импульсов тока  $t_n$  при постоянном значении  $J_m=250$  А/мм<sup>2</sup>

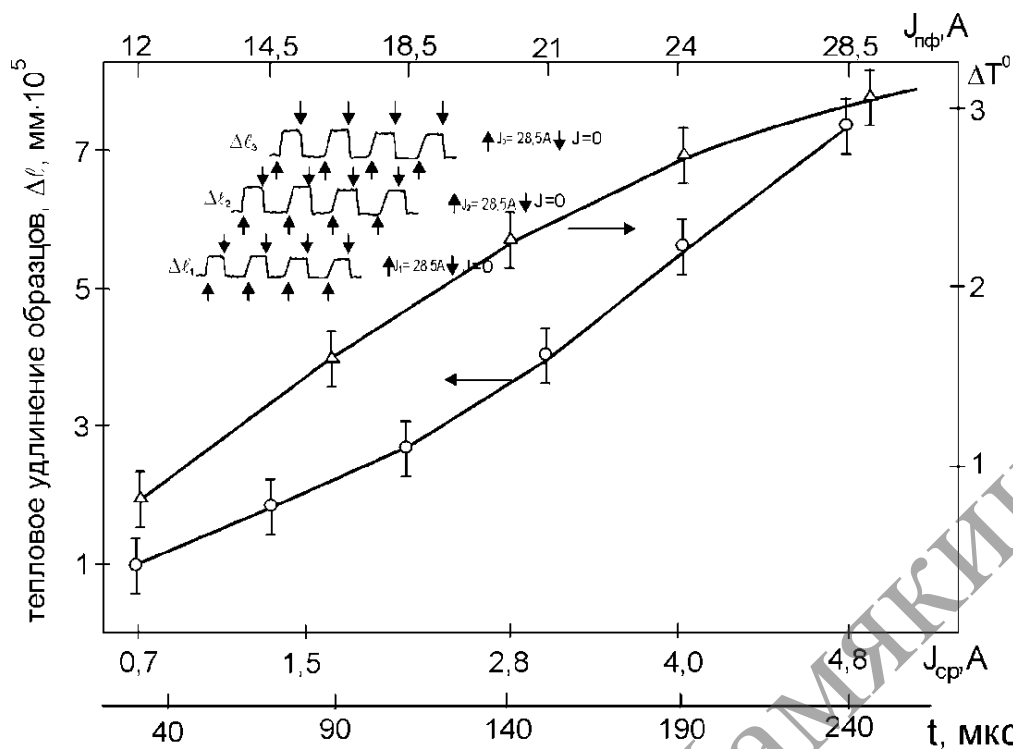


Рисунок 156. – Изменение температуры кристаллов  $\Delta T$  в зависимости от длительности импульсов тока  $\tau_u$  и величины средней плотности тока  $J_{cp}$  (измерения по дилатационным пикам и с помощью термопар)

На рис. 16а приведена зависимость относительно величины эффекта  $\delta$  (отнесенная к  $\Delta \epsilon$  при эквивалентном нагреве) от приложенных напряжений. Видно, что величина эффекта максимальна на I стадии деформации в области предела текучести кристаллов. Затем следует II стадия со слабым изменением  $\delta$  и, наконец, III стадия, характеризующаяся ростом  $\delta$  с увеличением  $\tau$ . Полученные результаты указывают на то, что ЭПЭ проявляется в максимальной мере во время неустановившейся ползучести.

Представляло интерес определить величину активационного объема  $V^*$  в районе предела текучести с тем, чтобы затем вычислить эффективные напряжения  $\Delta \tau^*$ , создаваемые током. На рис. 16б приведена зависимость  $V^*$  от  $\tau$ . Величина  $V^*$  находилась по формуле  $V^* = kT \frac{\ln \dot{\epsilon}_2 \dot{\epsilon}_1}{\delta \tau}$ , которая при

$$kT = 1,1 \cdot 10^{-14} \text{ эрг} \quad \text{и} \quad \delta \tau = 4 \cdot 10^5 \text{ дин/см}^2 \quad \text{принимает вид} \quad V^* = 2,5 \cdot 10^{-20} \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}.$$

Догрузки кристаллов осуществлялись после достижения кристаллами одних и тех же скоростей ползучести  $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ . Видно, что  $V^*$  уменьшается с ростом  $\tau$ , а в районе предела текучести  $\tau_c$  активационный объем равен  $V^* = 6,9 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3$ , который совпадает с  $V^* = 7,0 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3$ , полученным в работе [23] для кристаллов Zn при этих же температурах. Примерно такое же значение  $V^*$  получается при деформации кристаллов с эквивалентным нагревом. В этом случае изменение  $V^*$  не превышало 5%. Именно такое изменение  $V^*$  должно иметь место, согласно измеренной в работе [48]

температурной зависимости  $V^*$ , если принять  $\Delta T = 2-3^\circ$ . Указанное среднее значение  $V^*$  было использовано для расчета эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$ , создаваемых током при различных  $\tau_u$ . Использовались ранее приведенные формулы. На рис. 16в приведена зависимость  $\Delta\tau^*$  от  $\tau_u$ . Видно, что эта зависимость носит пороговый характер. В исследованном интервале значения  $\tau_u$  от 30 мкс до 240 мкс  $\Delta\tau^*$  возрастает примерно в 1,5 раза. Таким образом, зависимость ЭПЭ от  $\tau_u$ , действительно, носит сложный характер.

На рисунке 17 показана логарифмическая ползучесть кристаллов цинка (без показа мгновенной деформации в момент нагружения) при действии импульсами тока с разными  $\tau_u$ , при эквивалентном нагреве (заштрихованная область) и без тока при действующих напряжениях  $\tau = 0,7-0,9$  МПа. Линейный характер графиков свидетельствует о том, что примененное энергетическое воздействие не изменяет логарифмического закона ползучести. Из наклона этих графиков были получены значения коэффициента  $\alpha$  в уравнении логарифмической ползучести. Эти данные приведены на рис. 17б в зависимости от длительности импульсов  $\tau_u$ . Видно, что с ростом  $\tau_u$  происходит значительное увеличение  $\alpha$ . По сравнению с бестоковыми значениями  $\alpha$  увеличивается примерно в пять раз (при  $\tau_u = 240$  мкс).

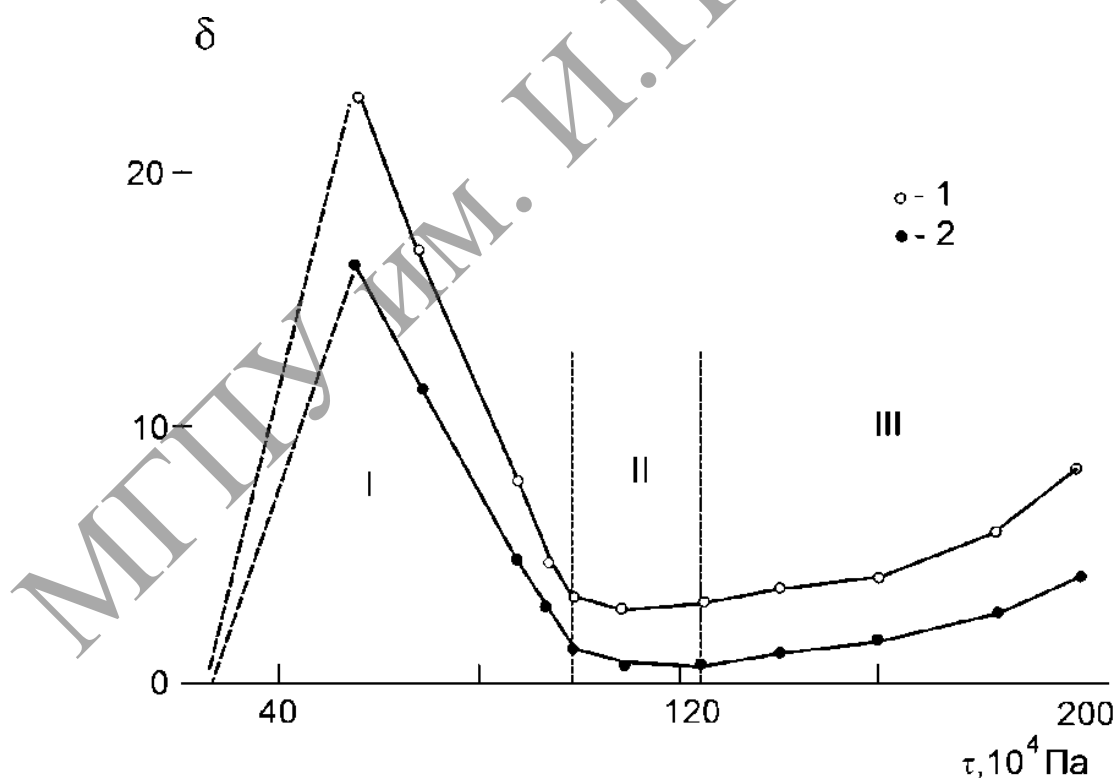


Рисунок 16а. – Относительная величина эффекта;  $\delta$  – изменения величины деформации ползучестью кристаллов цинка в зависимости от приложенных напряжений  $\tau$



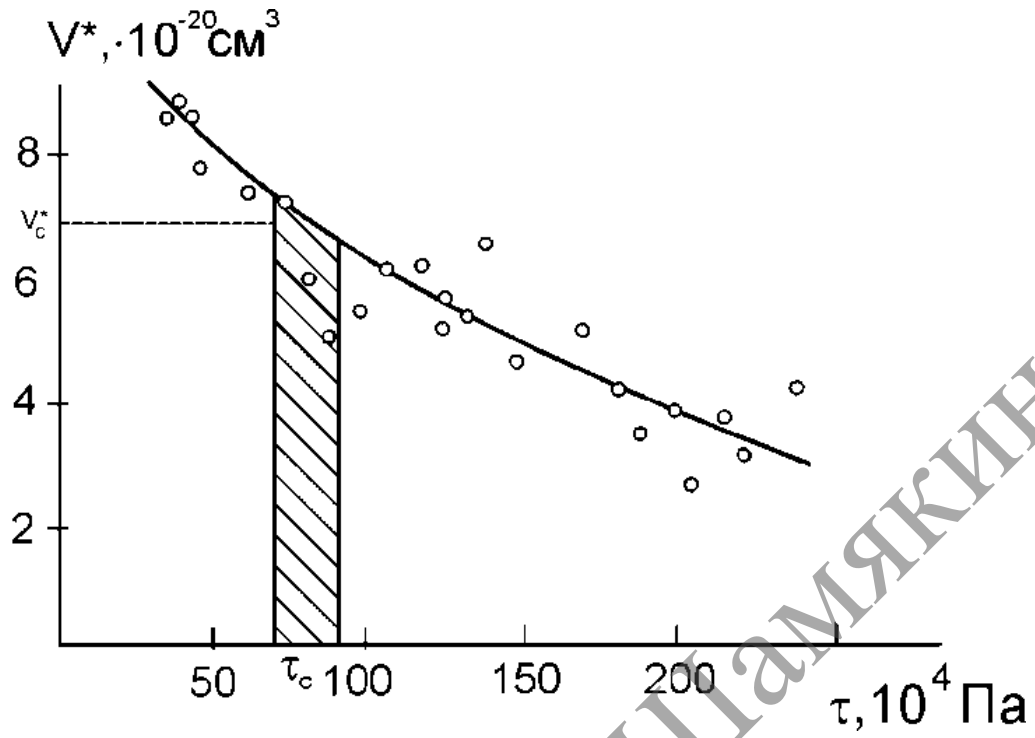


Рисунок 16б. – Величина активационного объема  $V^*$  при разных  $\tau$

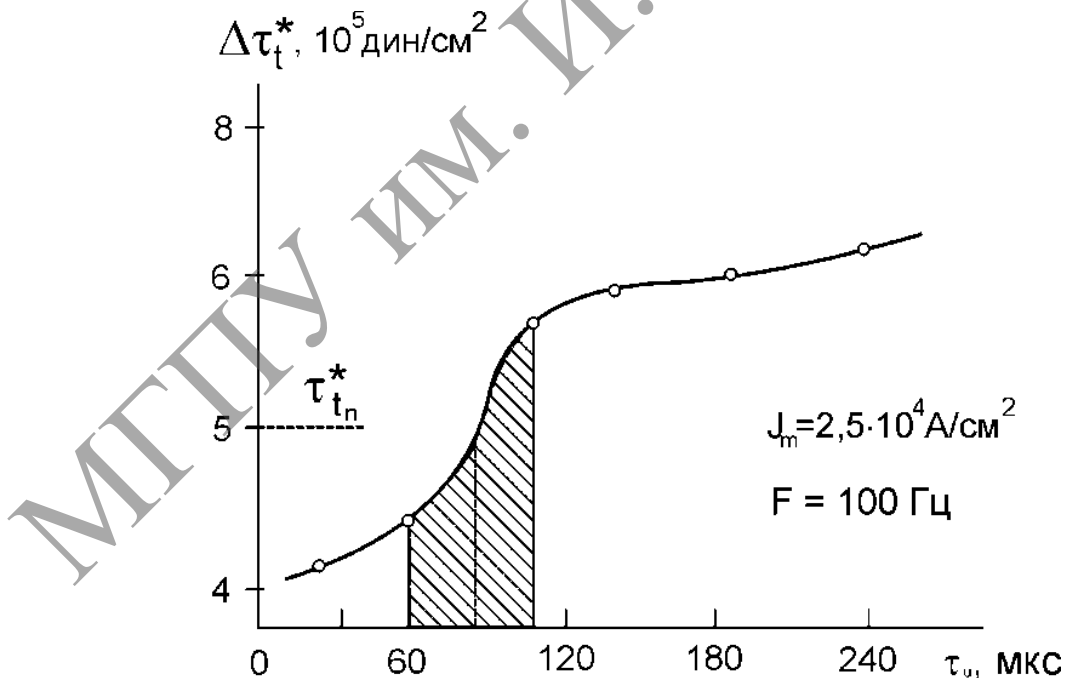


Рисунок 16в. – Зависимость величины эффективных напряжений  $\Delta\tau^*$  от длительности импульсов тока  $\tau_u$ .

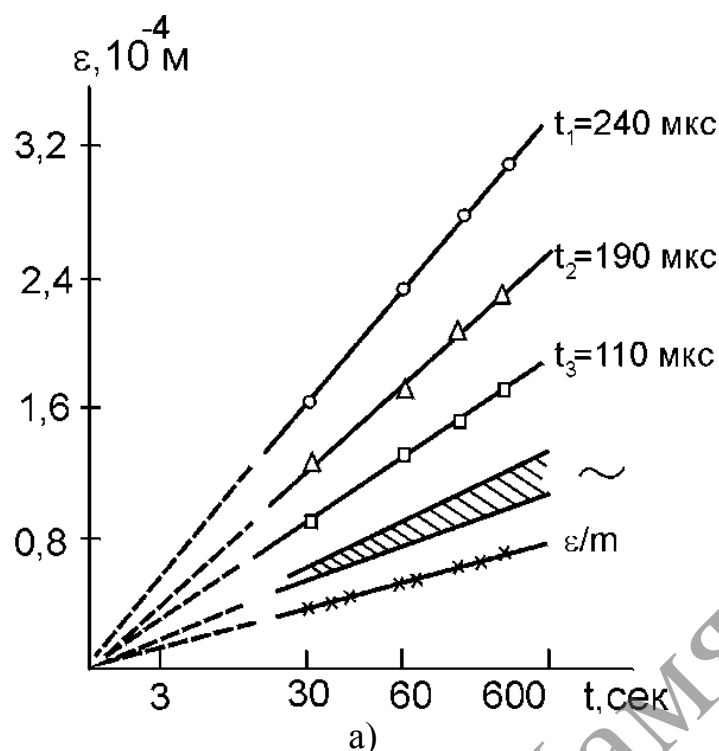


Рисунок 17а. – Логарифмическая ползучесть кристаллов цинка (без деформации в момент нагружения) при действии импульсами тока с разными длительностями импульсов  $\tau_u$ , при эквивалентном нагреве (заштрихованная область) и без тока

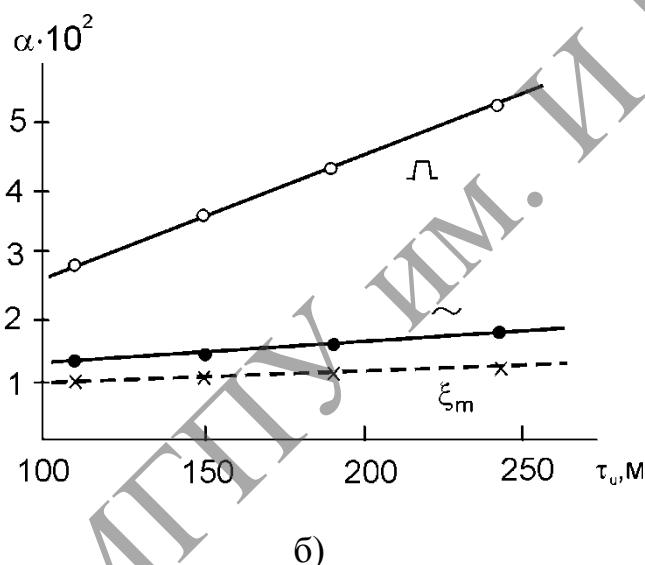


Рисунок 17б. – Изменение параметра  $\alpha$  в зависимости от  $\tau_u$

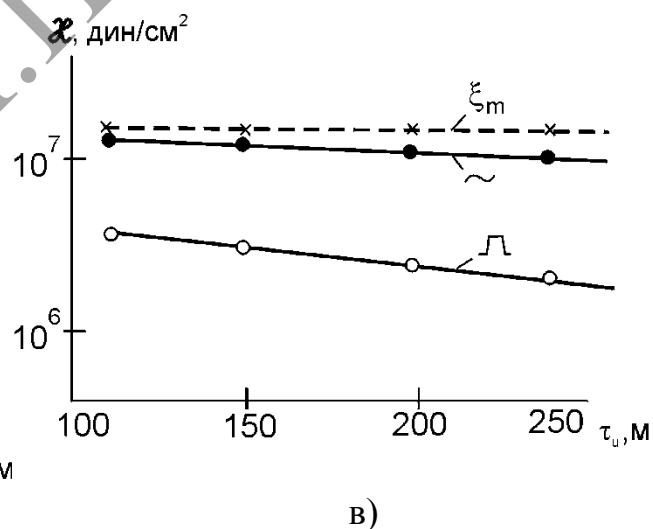


Рисунок 17в. – Зависимость коэффициента упрочнения  $\alpha$  от  $\tau_u$

На рисунке 17в приведена зависимость коэффициентов упрочнения  $\alpha$  от  $\tau_u$  (нижняя кривая) и величина  $\alpha$  для контрольных испытаний (без тока и при эквивалентном нагреве). Видно, что  $\alpha$  в результате действия тока уменьшается, и с ростом  $\tau_u$  величина этого эффекта усиливается. Это подтверждает данные по активной деформации кристаллов тока (уменьшение наклона кривых упрочнения под влиянием тока).

### 3.2.3. Выводы

1. С увеличением частоты следования импульсов происходит усиление эффекта действия тока, оцениваемого по изменению сопротивления кристаллов деформированию. Вместе с тем величина отдельных скачков деформации снижается в связи с истощением дислокационной структуры в предыдущих импульсах тока. Роль частотного фактора, очевидно, важна для эффективных попыток дислокаций преодолевать препятствия в плоскостях скольжения.

2. С увеличением амплитудной плотности тока в кристаллах величина эффекта также нарастает, начиная с некоторых пороговых значений плотности тока. Вызванная током пластическая деформация металла начинается не сразу, а по истечении некоторого времени задержки, равного единицам или десяткам секунд.

3. С увеличением длительности импульсов тока величина эффекта усиливается, а сам эффект появляется, начиная также с некоторых пороговых значений длительностей импульсов тока, соответствующих по величине временам элементарных скачков деформации в кристаллах. Зависимость эффекта от длительности импульсов можно связать с изменением механического импульса дислокационной структуры кристаллов.

4. Наблюдаемые механические эффекты нельзя объяснить термопластичностью или другими известными эффектами, не учитывая взаимодействие направленного потока электронов с дефектами кристаллов.

5. Нельзя также сводить ЭПЭ только к ускорению дислокаций электронами, т.е. к увеличению кинетической энергии последних, не рассматривая термоактивационную перестройку дислокационной структуры и механизм открепления дислокаций от стопоров.

6. Детальный учет указанных факторов позволит согласовать теоретические оценки эффекта действия тока с уже полученными экспериментальными результатами другими методами испытаний.

7. Действие импульсного тока эквивалентно приложению к кристаллам дополнительного эффективного напряжения, величина которого зависит от параметров тока.

## 3.3. Влияние тока на внутреннее трение в кристаллах

### 3.3.1. Методика эксперимента

Опыты проводились на отожженных кристаллах Cd (99,9995%) ориентации  $\chi = 30\text{—}35^\circ$  ( $\chi$  — угол между плоскостью базиса и осью образца) диаметром 0,85 мм и длиной 15 мм. Измерения динамических характеристик образцов проводились на автоматическом механическом спектрометре ДХП-2 [25]. Динамические модули упругости  $G'$  и потерь  $G''$  определялись в режиме гармонического сдвигового малоамплитудного деформирования в области линейной зависимости деформации от приложенных напряжений. Диапазон задаваемых амплитуд составил от 38 до

150 угловых минут. Опыты проводились при частоте круговых колебаний 1 Гц при температуре от 130 до 300 К. Погрешность определения динамических характеристик не превышала  $\pm 2\%$ . Измерения проводились при соблюдении последовательности режимов как без тока, с наложением переменного тока, так и импульсного частотой 100 Гц при амплитуде 200 А, длительности 50 мкс с фронтом нарастания и спада 5 и 8 мкс соответственно. Ток подводился к образцам через специальные зажимы, обеспечивающие электрическую изоляцию образца с током от корпуса реологического спектрофазометра (не нарушая режима его работы). Нагрев образцов при протекании электрического тока не превышал  $10^\circ$ , причем режимы переменного в 10–12 А и импульсного токов были выбраны так, что их тепловое действие было эквивалентным. Эквивалентность теплового действия проверялась в отдельных опытах с помощью отградуированной по прибору Ф 116/2 медно-константановой термопары.

### 3.3.2. Результаты измерений

На рисунке 18 приведены типичные зависимости дислокационного внутреннего трения от амплитуды, деформаций для температур 130, 250 и 300 К (серии кривых 1, 2, 3, где 1', 2', 3' — обозначения средних значений измеренных величин внутреннего трения в режимах: без тока, при действии переменного и импульсного токов соответственно). Из этих данных следует, что при увеличении амплитуды деформации выше критической  $\epsilon_{кр}'$  ( $\epsilon_{кр}'$  для температур 130, 250 и 300 К и амплитудах деформации соответственно 3, 1,8 и  $1,5 \cdot 10^{-4}$ )  $\text{tg } \Phi$  практически линейно возрастает с амплитудой. Измерения при заданном режиме в выбранном интервале амплитуд деформаций не превышали 15–20 с, что не вызывало необратимых изменений характеристик внутреннего трения. При амплитудах выше  $\epsilon_{кр}'$  затухание было обусловлено различными источниками внутреннего рассеяния энергии, однако один из них играет первостепенную роль. Ввиду сравнительно незначительного увеличения внутреннего трения с амплитудой (с некоторым приближением для качественных и количественных оценок) примем модель, предложенную Келером [25, 26]. Из графика видно, что внутреннее трение повышается при наложении электрического тока, причем переменный ток вносит больший вклад, чем импульсный. С повышением температуры характер указанной закономерности не меняется.

Видно, что с повышением температуры затухание несколько падает, а затем начинает расти. Температура, при которой повышается затухание, с увеличением амплитуды понижается. С повышением амплитуды деформации серия кривых сдвигается в сторону больших значений затухания, причем тем больше, чем больше амплитуда.

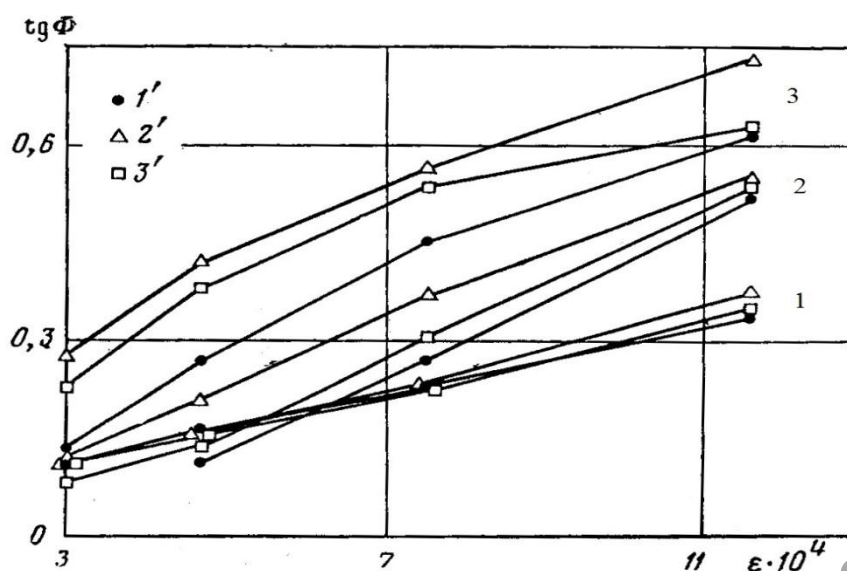


Рисунок 18. – Амплитудная зависимость внутреннего трения при нагружениях, повторяющихся с частотой  $\omega=1$  Гц для температур 130, 250 и 300 К; кривые 1, 2, 3 соответственно, где 1', 2', 3' — обозначения средних значений измеренных величин внутреннего трения в режимах: без тока, при действии переменного и импульсного токов

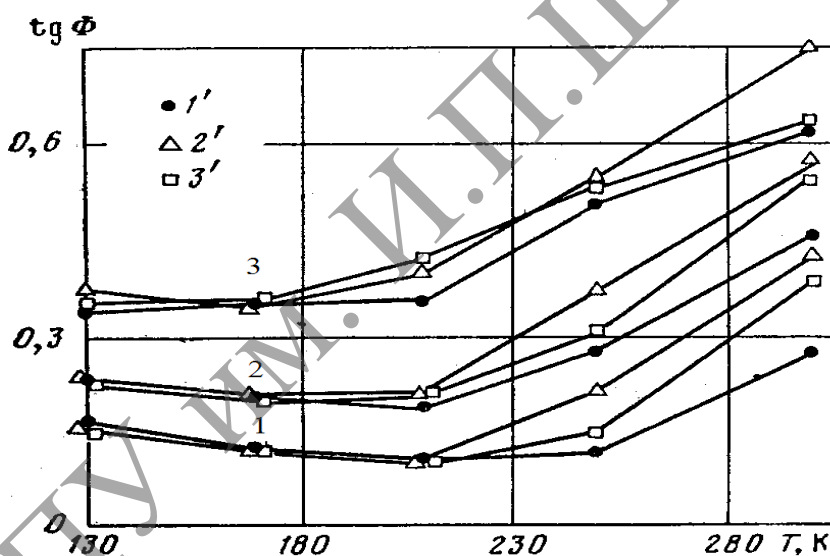


Рисунок 19. – Зависимость внутреннего трения от температуры при нагружениях, повторяющихся с частотой  $\omega=1$  Гц. Кривые 1, 2, 3 – при амплитудах деформации 4, 7, 11,6 · 10<sup>-4</sup> соответственно. Кривые 1', 2', 3' — обозначения те же, что и на рис. 18

Внутреннее трение в случае переменного тока по-прежнему больше, чем в случае импульсного тока, но при амплитуде деформации  $11,6 \cdot 10^{-4}$  для температуры 170 К, с которой начинается повышение затухания, а также при температуре 210 К внутреннее трение при наложении импульсного тока выше.

### 3.3.3. Обсуждение результатов

Полученные результаты можно объяснить на основе модели колеблющейся струны. Объемная сетка дислокаций, пронизывающая кристалл, вызывает при его нагружении до напряжений, меньших предела текучести, деформацию, равную сумме упругой и неупругой деформаций. Начиная с относительно небольших напряжений, линии дислокаций, образующие, в частности, источники Франка — Рида, начинают выгибаться. Электроны проводимости при наложении электрического поля, взаимодействуя с дислокационными сегментами, увеличивают их длину, способствуя дальнейшему разрастанию дислокационной дуги. Следствием этого является дальнейшее уменьшение истинного модуля сдвига  $G$ , а при нагружениях, повторяющихся с частотой  $\omega$ , наблюдается внутреннее трение.

### 3.3.4. Выводы

Действие электронов проводимости во время импульсного тока на динамическое торможение медленных дислокаций несомненно. При этом происходит уменьшение скорости затухания колебательного движения дислокационных сегментов, смещается максимум коэффициента торможения в сторону более низких температур и повышается вероятность флуктуационного преодоления дислокациями препятствий. Доля вклада энергии, передаваемой токовыми электронами дислокациям различна при различных скоростях движения дислокаций. С изменением температуры также изменяется относительная роль динамических и термофлуктуационных процессов, лимитирующих подвижность дислокаций, что следует учитывать при изучении влияния действия дрейфующих электронов проводимости на подвижность дислокаций.

## Использованная литература:

1. Фелтам, П. Деформация и прочность материалов / П. Фелтам. – М.: Металлургия, 1968. – 120 с.
2. Кузнецов, Р.И. Пластическая релаксация напряжений в алюминии и меди / Р.И. Кузнецов, В.А. Павлов, В.Т. Шматов.// Физика металлов и металловедение. – 1966. – Т. 21. – С. 265–272.
3. Троицкий, О.А. Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта / О.А. Троицкий, В.И. Спицын, В.И. Стащенко // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 256. – С. 1134–1137.
4. Granato, O. Dislocation inertial model for the increased plasticity of the superconducting state / O. Granato // Phys. Rev. Lett. – 1971. – Vol. 27. – P. 660–665.
5. Кравченко, В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации./ В.Я. Кравченко // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1966. – Т. 51. – С. 1676–1681.
6. Троицкий, О.А. Электропластическая деформация металла / О.А. Троицкий, А.Г. Розно // ФТТ. – 1970. – Т.12. – С. 203–210.
7. Рошупкин, А.М. [и др.]// ДАН. – 1986. – Т.286, № 3. – С. 633–636.
8. Батаронов, И.Л. Электропластическая деформация металлов и динамический пинч-эффект./ И.Л. Батаронов, А.М. Рошупкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 8. – С. 57–61.
9. Рошупкин, А.М. Об эффекте электрон-фононного увлечения дефектов в кристаллах / А.М. Рошупкин, И.Л. Батаронов // Изв. РАН, серия Физическая. – 2004. – Т. 68, № 7. – С. 998–1007.
10. Спицын, В.И. Электропластический эффект в металлах./ В.И. Спицын, О.А. Троицкий // Вестн. АН СССР. – 1974. – № 11. – С. 10–14.
11. Климов, К.М. Влияние градиента температуры и электрического тока высокой плотности на пластическую деформацию при растяжении металлических проволок / К.М. Климов, И.И. Новиков // Изв. АН СССР, Сер. Металлы. – 1978. – № 6. – С. 175–179.
12. Гегузин, Я.Е. Влияние длины свободного пробега электронов на образование трека вокруг частицы./ Я.Е. Гегузин, М.И. Каганов, И.М. Лифшиц // ФТТ. – 1973. – Т.15. – С. 2425–2430.
13. Nabarro, F.R. Theory of crystal dislocation / F.R. Nabarro // Oxford: Clarendon press. – 1967. – 821 p.
14. Welch, D. Exhaustion theory of creep in metals at low temperatures / D. Welch, R. Smohichoweki // J. Phys. and Chem. Solids. – 1972. – V. 33. – P. 1115–1120.
15. Стащенко, В.И. Влияние формы и режимов прохождения тока на пластическую деформацию кристаллов цинка / В.И. Стащенко, О.А. Троицкий // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 267. – С. 638–642.

16. Сташенко, В.И. Влияние амплитуды импульсного тока на скорость ползучести кристаллов цинка./ В.И. Сташенко, О.А. Троицкий // Пробл. Прочности, – 1982. – № 10. – С. 46–49.
17. Сташенко, В.И. Влияние частоты импульсного тока и внешнего механического напряжения на скорость ползучести кристаллов / В.И. Сташенко, О.А. Троицкий // Физика металлов и металловедение. – 1982. – Т. 53. – С. 180–184.
18. Троицкий, О.А. Влияние длительности импульсов тока на скорость ползучести кристаллов цинка./ О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.И. Спицын // Изв. АН СССР, сер. Металлы. – 1982. – № 1. – С. 164–168.
19. Сташенко, В.И. Определение механических напряжений, вызванных действием тока./ В.И. Сташенко, О.А. Троицкий // Физика металлов и металловедение. – 1981. – Т. 51. – С. 219–221.
20. Приборы для исследования динамических характеристик полимеров на низких и инфракрасных частотах / Л.П. Ульянов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 11. – С. 1402.
21. Nabarro, F.R. Theory of crystal dislocation / F.R. Nabarro // Oxford: Clarendon press. – 1967. – 821 p.
22. Welch, D. Exhaustion theory of creep in metals at low temperatures / D. Welch, R. Smohichoweki // J. Phys. and Chem. Solids. – 1972. – V. 33. – P. 1115–1120.
23. Солдатов, В.П. [и др.]// Физика металлов и металловедение. – 1975. – № 3 (39). – С. 455–460.
24. Старцев, В.И. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах / В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов. – М.: Изд-во "Металлургия", 1975.
25. Koehler, J.S. Imperfections in Nearly Perfect Crystals / J.S. Koehler, N.J. Wiley, 1952. Chapter 7.
26. Рахматулин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.Л. Демьянов. – М.: Физматгиз, 1961. – 305 с.



## ГЛАВА IV. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Воздействие импульсного тока на проводник сопровождается рядом физических процессов. Такие процессы носят как чисто электромагнитный характер в виде генерации электрического и магнитного полей, излучения электромагнитных волн, так и явления, связанные с преобразованием энергии электрического импульса в изменение структуры металла, выделения тепловой энергии, а также изменение механических свойств, механическими перемещениями и генерацией колебательных процессов в материале образца и внешней среде в виде акустических процессов. При описании механического действия тока обычно используют термин пондеромоторное действие тока. Импульсный ток большой плотности, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести, помимо электронно-пластического действия, оказывает и пондеромоторное действие на деформируемый материал, обуславливая механические напряжения. При действии поперечного поля Холла на ионный остов кристаллической решетки металла, с периодичностью подачи импульсов тока, на фронте его нарастания, создается ультразвуковая вибрация, которая активно влияет на кинетику пластической деформации и модифицирует служебные характеристики материала. При практическом использовании технологии электропластической деформации, особенно при обработке металлов давлением при волочении, прокатке и так далее, имеет смысл проанализировать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам. При деформации металла в условиях электропластичности для реализации оптимальных значений достижения максимума пондеромоторных факторов необходимо выбирать частоту импульса тока, при которой магнитное поле не успевает существенно проникать в образец, при этом скорость диффузии будет зависеть от проводимости металла и частоты тока, в которых испытываемые конструктивные элементы работают при эксплуатации.

В зависимости от величины импульсного тока пондеромоторное действие может проявляться в виде относительно небольших упругих деформаций, а при увеличении амплитуды импульсов действие может значительно изменять пластические свойства материала проводника, вызывать изменение фазового состава и формы, приводить к дефрагментации, а при больших амплитудах вызывать полное разрушение с эффектом взрыва и стратификацией продуктов разрушения.

Наиболее широкое применение пондеромоторное действие импульсных токов в настоящее время нашло при обработке металлов с использованием прокатки и вытяжки. Рассмотрим некоторые примеры таких применений.

#### 4.1. Прокатный стан для получения ленты из нержавеющей стали

Для процессов электропластической прокатки (ЭПП) полосы листов стали небольших сечений при небольших скоростях прокатки ( $v_n < 0,5$  м/с), а также для скоростных процессов ЭПП с  $v_n > 0,5$  для тонколистовых заготовок пригодны следующие режимы импульсного тока: амплитудная плотность тока  $J_m = 5 \cdot 10^5 - 10^6$  А/см<sup>2</sup>; частота импульсов  $f = 10^4$  Гц; длительность импульсов  $t_u = (40-50) \cdot 10^6$  с; скважность импульсного процесса  $Q = 1-2$ ; коэффициент заполнения импульсами порядка 1-0,5.

Снижение скорости прокатки  $v_n$  не сказывается существенным образом на соотношении тепловых действий импульсного и постоянного тока. Вместе с тем, снижение  $v_n$  оказывает положительное влияние на процесс ЭПП, так как скорость дрейфа электронов  $v_e$  начинает превышать скорость пластической деформации металла в рабочей зоне ЭПП, т.е. выполняется условие  $v_e > v_n$ , необходимое для реализации ЭПЭ. По этим же причинам на высокоскоростных станах при  $v_n = 3-5$  м/с не имеет смысла вводить технологию ЭПП, так как условие  $v_e > v_n$  заведомо не будет выполняться даже при труднодостижимых в динамическом режиме плотностях тока  $J_m = 10^6$  А/см<sup>2</sup>. Технологию ЭПП целесообразно использовать лишь при низких и средних скоростях прокатки (не более 0,5 м/с), либо осуществлять высокоскоростную ЭПП на очень тонких заготовках.

В совместной работе ИМАШ РАН и ЦАГИ были установлены режимы импульсного тока для прокатки нержавеющей стали: амплитудная плотность тока  $J_m = 10^4 - 10^5$  А/см<sup>2</sup>, длительность импульсов  $t_n = 150 - 200 \cdot 10^{-6}$  с, частота следования импульсов  $F = 500 - 800$  Гц. Был разработан и создан опытный образец прокатного стана, работающего по безотжиговой технологии ЭПП для получения полосы из нержавеющей стали с использованием ЭПЭ в зоне деформации без применения промежуточных отжигов. Стан создавался по заказу Южной Кореи.

В процессе испытаний стана производилась многократная прокатка полосы из нержавеющей сталей типа 12Х18Н9 и 12Х18Н10Т от начальной толщины 2 мм до конечной толщины 0,3 мм без промежуточных отжигов. При этом за счет рационального выбора параметров импульсного тока было предотвращено появление окисной пленки. Скорость прокатки выдерживалась в пределах (0,3-0,5) м/сек. Характеристики созданного оборудования обеспечивала скорость прокатки до 1 м/мин. Суммарная электрическая мощность на режиме максимального потребления составляла примерно 150 кВт. Установленная мощность составляла 210 кВт. Максимальное амплитудное значение импульсного тока  $I_m$  составляло 45 кА. Плотность тока  $J_m$  в стальной полосе в зоне деформации составляла 300-800 А/мм<sup>2</sup> в зависимости от текущей толщины полосы. Были проведены испытания созданного оборудования и систем прокатного стана, которые подтвердили соответствие созданного оборудования современным требованиям.

Параметры стана ЭПП позволили реализовать режим на основе использования ЭПЭ для полосы из нержавеющей стали толщиной 2 мм и шириной до 100 мм без промежуточных отжигов за счет «торможения» процесса аустенитно-мартенситного фазового превращения и упрочнения (нагартовки) в процессе прокатки стальной полосы.

На рисунке 1 приведен общий вид и схема опытно-промышленного стана для получения ленты из нержавеющей стали с использованием электропластического эффекта в зоне деформации металла.

Отдельные узлы стана представлены на рисунке 2–4. Результаты измерений физико-механических свойств стальной полосы после обычной и электропластической прокатки приведены на рисунке 5–7.

а)

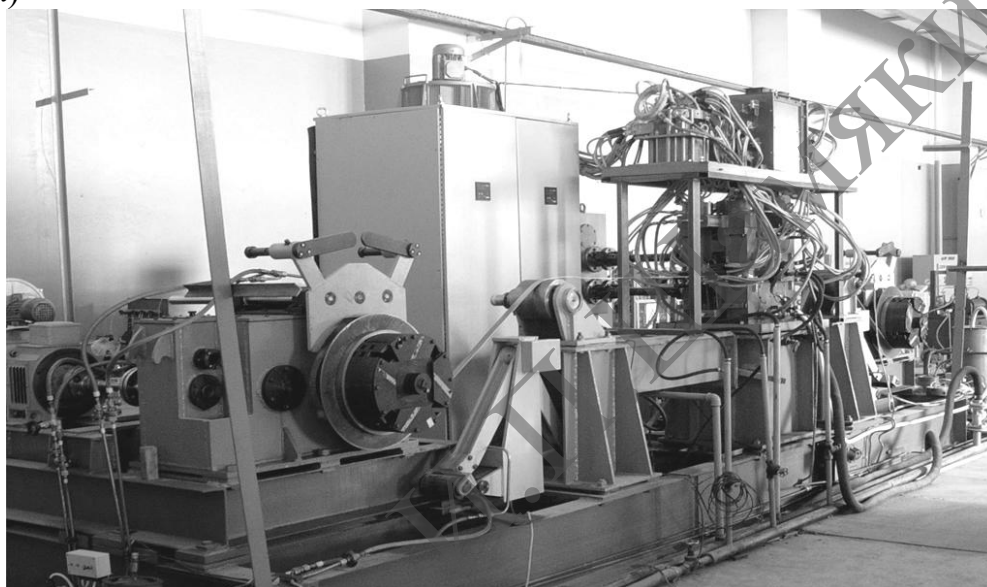
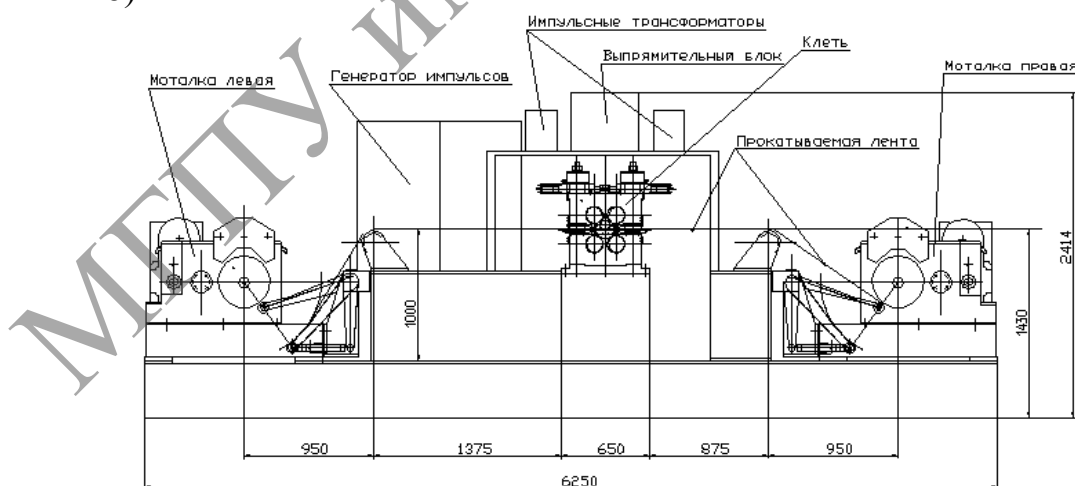


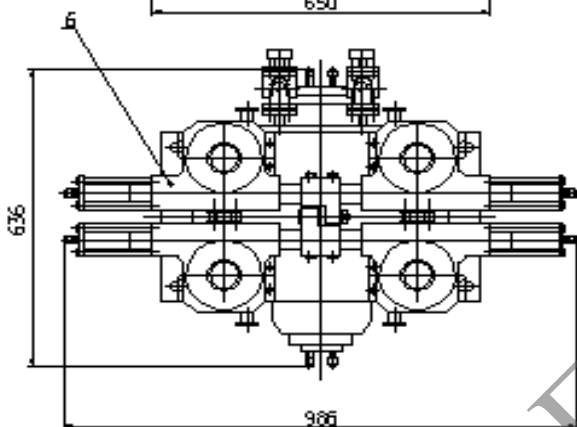
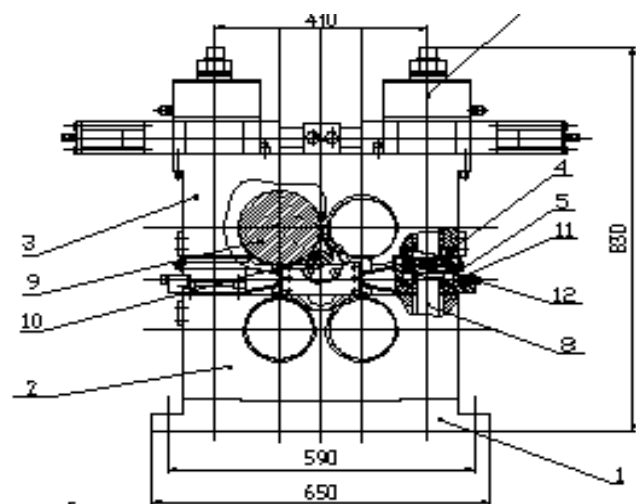
Рисунок 1а. – Общий вид стана ЭПП конструкции ЦАГИ

б)



1, 6 – приемно-сдаточный механизм для обрабатываемой ленты; 2, 3 – генератор импульсного тока; 4 – блок управления; 5 – прокатная клеть с импульсным током в 3Д; 7 – устройство противонатяжения ленты

Рисунок 1б. – Структурная схема стана электропластической прокатки стальной ленты



- 1-Основание
- 2-Подушка нижняя
- 3-Подушка верхняя
- 4-Винт
- 5-Гайка
- 6-Привод гидромеханический
- 7-гидроцилиндр
- 8-Шпилька
- 9-Опорный валок
- 10-Рабочий валок
- 11-Сухарь
- 12-Винт

Рисунок 2. – Прокатная клеть и скользящие контакты

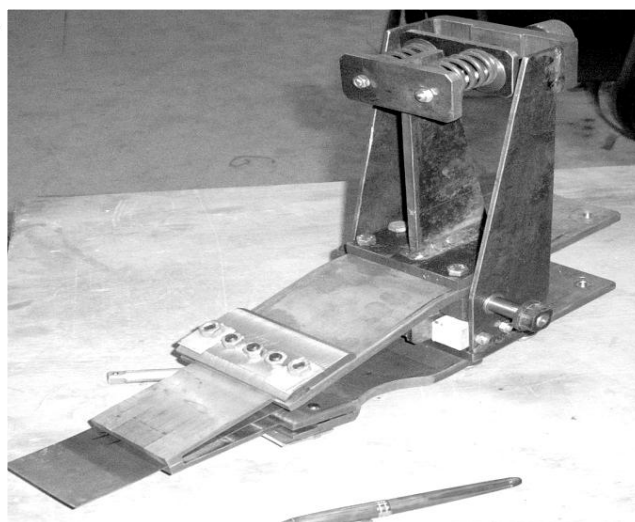
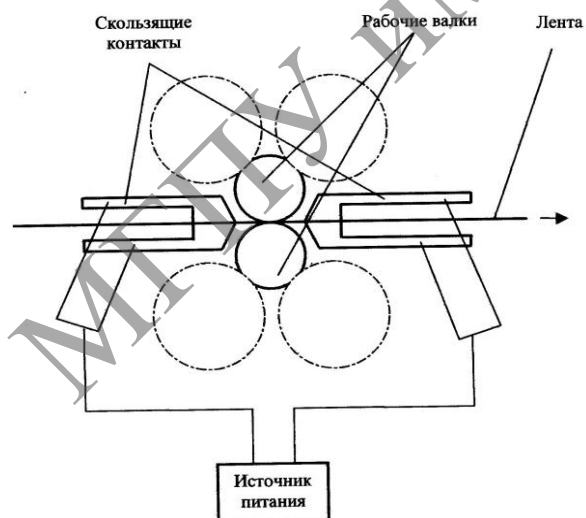


Рисунок 3. – Схема и вид скользящих контактов

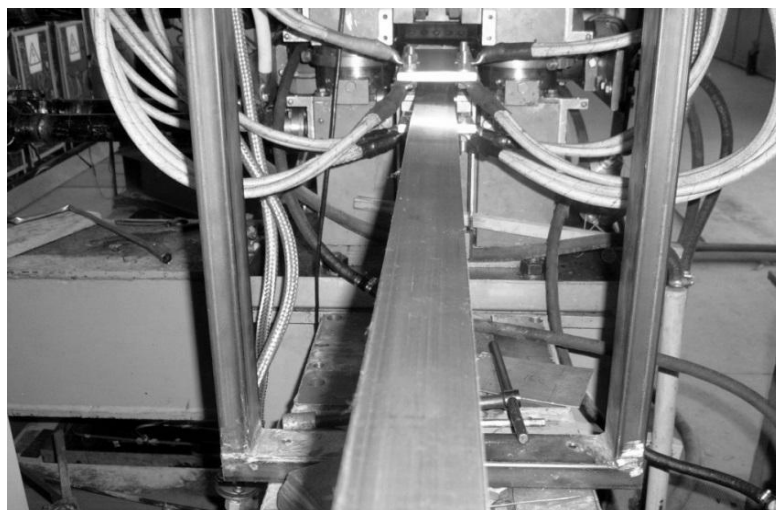


Рисунок 4. – Прокатка стальной полосы по технологии ЭПШ

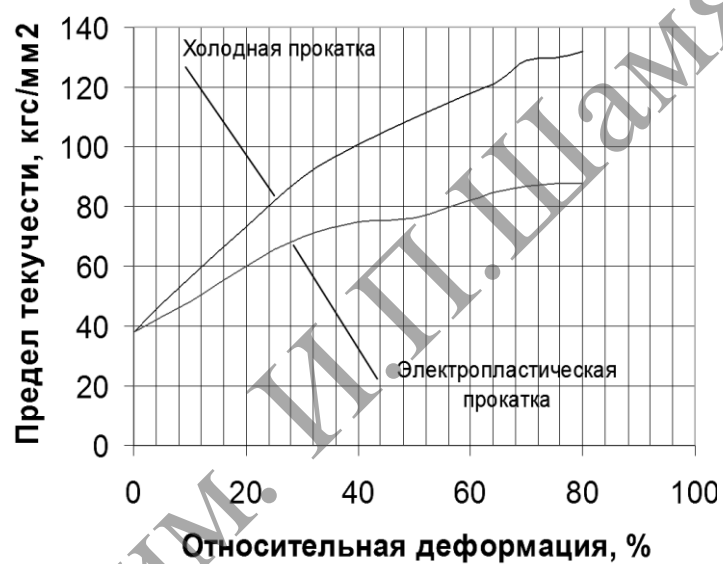


Рисунок 5. – Изменение предела текучести

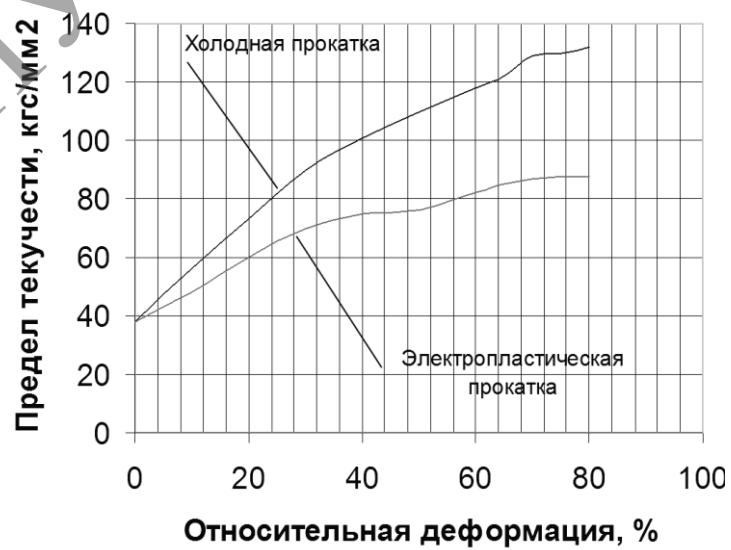
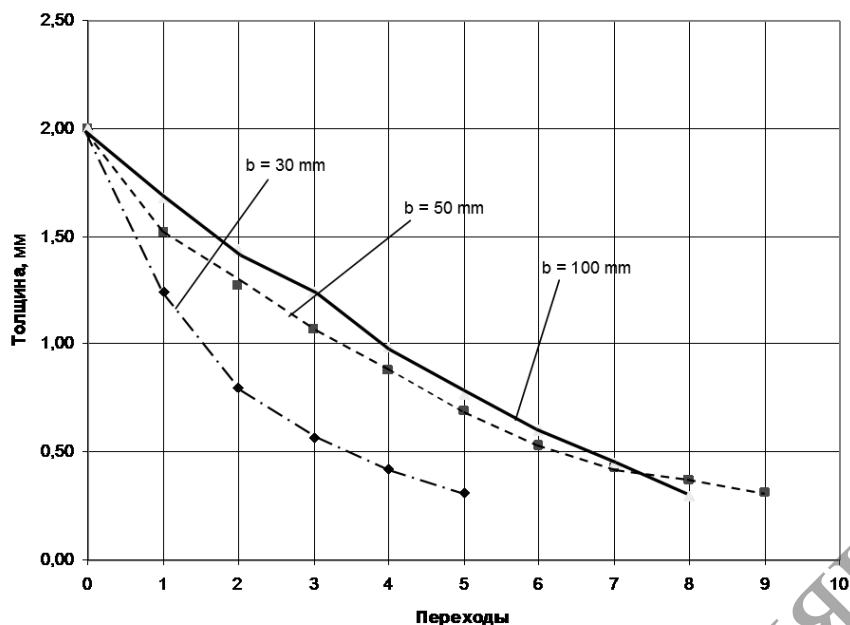


Рисунок 6. – Изменение твердости



**Рисунок 7. – Изменение толщины стальной полосы по переходам**

В работе использовалась лента из нержавеющей стали различного типа. Ширина ленты 100 мм, начальная толщина 2,0 мм, конечная толщина 0,3 мм с погрешностью прокатки не более 0,01 мм.

Прокатный стан обеспечил прокатку ленты из нержавеющей стали от начальной и конечной толщины без промежуточных отжигов. Не допускалось появление окисной пленки на поверхности ленты в процессе ее прокатки. Максимальная скорость прокатки до 60 м/с (для лент толщиной 0,3 мм). Суммарная потребляемая электрическая мощность была порядка 200 кВт. Стан включает в себя следующее оборудование и системы:

- технологическое оборудование (прокатная клеть, устройства подачи-приема ленты (моталки) 2 шт., основание (рама), устройства жидкостного охлаждения рабочих валков и ленты, электроконтактные устройства для подведения тока к прокатываемой ленте;
- гидравлическое оборудование (основная и вспомогательная гидросистемы);
- электротехническое оборудование (главный привод, привода устройств подачи-приема ленты (моталки), шкафы для подачи электропитания на приводы и источники питания для электропластификации ленты 3 шт.;
- система управления и измерений (пульт управления, датчики измерения положения элементов клетки и режимов прокатки);

Предусматривается 6-валковая схема прокатной клетки с двумя парами приводных опорных валков и парой рабочих валков.

Устройство приема-подачи ленты (моталки) должно обеспечивать работу стана в реверсивном режиме, обеспечивая при этом заданное натяжение ленты. Моталки должны иметь оснащение устройствами съема

прокатанной ленты, а также рычажными прижимами, которые препятствуют «распушению» прокатанной ленты. Основные характеристики их конструкции следующие: диаметр барабана – 400 мм; максимальный диаметр рулона – 1000 мм; максимальное усилие натяжения ленты – 8 кН.

Основание для фиксации агрегатов (клетей и моталок) выполнялось в виде плоской сварной рамы, которая обеспечивала необходимую точность взаимного расположения агрегатов прокатного стана без дополнительного крепления их к бетонному полу.

Электроконтактные устройства обеспечивают возможность подведения тока к прокатываемой ленте.

Предусматривалось охлаждение контактов и рабочих валков.

Предусматривались две автономные гидравлические системы стана:

- основной гидросистемы, обеспечивающей работу гидроприводов прокатной клетки и моталок;
- вспомогательной гидросистемы, обеспечивающей смазку подшипников опорных валков и их охлаждение.

Одним из наиболее ответственных элементов стана ЭПП является источник питания для электрической обработки прокатываемой ленты во время прокатки, а именно генератор импульсного тока (ГИТ).

Генератор импульсного тока потребляет:

- напряжение питания 380/220 В промышленной частоты 50 (60) Гц;
- выдает импульсы тока колоколообразной формы;
- имеет максимальные амплитуды тока при номинальной нагрузке – 45,0 кА;
- длительность импульсов тока по основанию импульсов при номинальной нагрузке составляет 200 мкс;
- частота повторения импульсов регулируется в пределах от 1 до 1000 Гц;
- охлаждение воздушно принудительное.

Применение импульсного тока при ЭПП имеет следующие преимущества по сравнению с обычной прокаткой:

- повышается производительность станов в 1,5 раза;
- устраняются операции промежуточных отжигов;
- уменьшается анизотропия материала;
- уменьшается энергопотребление приводами прокатных станов на 25–30 %;
- повышается остаточная пластичность заготовок;
- увеличивается длина заготовок на 10–15 % за счет сокращения их ширины;
- подавляются нежелательные структурно-фазовые превращения.

Таким образом, обеспечивается получение ленты из нержавеющей стали без промежуточных отжигов с получением высокого качества заготовки при существенном снижении трудоемкости изготовления полуфабрикатов. Применение технологии ЭПП на современных станах на

импульсном токе открывает новые возможности для автоматического регулирования процесса прокатки. Путем изменения амплитуды и частоты следования импульсов по сигналам датчиков давления на валках можно усиливать или, напротив, ослаблять электропластическое действие тока. В результате будет уменьшаться или увеличиваться толщина проката, изменяться также (в обратном соотношении) ширина заготовки. При этом зазор между валками останется без изменений, что позволит избежать нежелательного увеличения толщины заготовки (подката) при упругом отжати валков.

## **4.2. Ротационная электропластическая вытяжка металла**

### **4.2.1. Общая схема опытов**

Работа по электропластической ротационной вытяжке металла (ЭПВыт) была осуществлена О.А. Троицким и В.А. Игнатьевым в период с 2006–2009 г.г. на ФГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова в г. Н. Новгороде.

В супергерметичных электронасосах различных размеров, спроектированных и изготавливаемых в ОАО «ОКБМ Африкантова» для герметизации статорной полости насосов, устанавливаются тонкостенные обечайки (“рубашки”) из сплава ХН78Т по ГОСТ 5632-72. Существовавшая ранее технология и оснастка для их производства методом обычной ротационной вытяжки базировалась на использовании токарно-винторезного станка, например, модели 165 с простой многостадийной механической ротационной вытяжкой заготовок обечаек с помощью стальных шариков, обремененная необходимостью проводить операции промежуточных отжигов. Ротационной вытяжке подвергались цилиндрические обечайки диаметром 80 мм с исходной толщиной стенки 2,0 мм до конечной толщины стенки 0,5 мм. ЭПВыт осуществлялась с помощью 20 стальных шариков в специальной обойме. Электрический ток подводился минусом к обойме с шариками и плюсом к оправке, на которой находилась заготовка обечайки, как показано на рисунке 1). Оправка была вставлена в шпиндель токарного станка. Суппорт станка обеспечивал плавное перемещение обоймы с шариками вдоль заготовки. Электропластическая деформация осуществлялась шариками в обойме. На один шарик приходилось примерно 200 А амплитудной силы импульсного тока. Охлаждение и смазка зоны деформации заготовки осуществлялись минеральным маслом. За 8–10 проходов ЭПВыт заготовки удлинялись на 450–500 %.

В ходе ЭПВыт не потребовалось проводить ни одного промежуточного отжига. В этом состоит основное преимущество ЭПВыт металла по сравнению с обычной ротационной вытяжкой. Искрений в обойме с шариками и нагрева заготовки не наблюдалось. Сопутствующий нагрев в условиях интенсивного охлаждения узла деформации проточным минеральным маслом не превышал 75°С.



#### 4.2.2. Обычная ротационная вытяжка металла

При обычной ротационной вытяжке обечаек, являющихся важной частью герметичных электронасосов для перекачки агрессивных жидкостей и нефтепродуктов, после каждого прохода вытяжки требовалось осуществление операции вакуумного аустенизирующего отжига. Для этого заготовки обечаек заваривались в специальные контейнеры и отправлялись в вакуумную печь, что приводило к потерям времени и являлось дорогостоящей энергоемкой операцией.

Сущность обычной ротационной вытяжки обечаек состоит в том, что в качестве деформирующего инструмента применяются также несколько десятков стальных шариков, расположенных по периметру деформируемой заготовки обечайки, насаженной на оправку. Последняя устанавливается в шпиндель токарного станка. Деформирующие шарики, в свою очередь, заключены в единую обойму – шариковую матрицу, т. е. так же, как и при ЭПВыт.

Процесс вытяжки (обычной и электропластической) заключается в последовательном наложении локальных деформаций осадками и вытяжками элементарных объемов цилиндрической заготовки обечайки за счет нарастающего давления, суммирования этих давлений и деформаций в процессе перемещения шариков продольно вдоль заготовки вместе с обоймой и одновременно все вместе по окружности вокруг заготовки. Подача обоймы с шариками осуществляется суппортом станка с некоторым небольшим шагом, порядка 1 мм/мин. Глубина обжатия за один проход находится как  $a = \delta_0 - \delta$ , где  $\delta_0$  и  $\delta$  – толщина стенки до и после единичного обжатия. Наложение указанных двух движений инструмента приводит к тому, что материал заготовки обечайки деформируется по спирали и вытягивается в зазор между вращающейся оправкой (пуансоном), закрепленным в шпинделе токарного станка и шариками, расположенными в шариковой матрице. Локальный характер очага деформации в условиях вращения деформирующего инструмента обеспечивает возможность деформирования детали с меньшим усилием, чем при глубокой вытяжке металла. За один проход рекомендовалось деформирование стенки будущей обечайки в пределах 30 %, что определялось мощностью применяемого токарно-винторезного станка модели 165.

Прогрессивность обычной ротационной вытяжки заключается в том, что локальный характер очага деформации в условиях вращения обрабатывающего инструмента (шариков) обеспечивает возможность деформирования заготовки обечайки с меньшим усилием, чем при глубокой вытяжке металла. Скорость деформирования (число оборотов шпинделя станка и скорость подачи обоймы с шариками, установленной на суппорте станка) должны обеспечивать допустимую скорость деформации для данного материала и размера обечайки.

Тем не менее прогрессивная технология обычной ротационной вытяжки металла с помощью стальных шариков имеет большой недостаток из-за необходимости постоянно ее прерывать и осуществлять энергоемкие операции промежуточных отжигов заготовок.

По указанной энергоемкой технологии практически после каждого прохода обычной ротационной вытяжки выполняются операции промежуточных отжигов – стабилизирующие термообработки заготовки в вакуумной печи. В общей сложности, учитывая необходимость сделать 6–8 проходов для вытяжки обечайки на сотни процентов, общее время изготовления одной обечайки составляло 4–5 дней.

Таким образом, прежняя технология изготовления обечайки  $\varnothing 80$  мм с толщиной стенки  $S = 0,5$  мм и длиной  $L = 344$  мм базировалась на использовании сплава ХН78Т ГОСТ 5632-72, а основным заводским способом изготовления обечаек является метод ротационной вытяжки с использованием в качестве деформирующего инструмента стальных шариков и токарно-винторезного станка, например, модели 165.

#### 4.2.3. Электропластическая ротационная вытяжка металла

С целью повышения производительности установки в несколько раз и исключения энергоемких операций промежуточных отжигов авторами новой технологии электропластической вытяжки (ЭПВыт) обечайки была осуществлена деформация ее заготовки вытяжкой с одновременным действием импульсов тока встречного направления в зоне между деформирующими шариками из шариковой матрицы (обоймы) и заготовки обечайки, находящейся на оправке. Разработка новой технологии производилась с использованием семи обечаек размером  $\varnothing 80$  мм по диаметру с толщиной стенки  $S=0,5$  мм.

В качестве источника импульсного тока использовался генератор встречных импульсов тока (ГВИТ) мощностью  $\approx 5$  кВт. Для подключения ГВИТ были спроектированы и изготовлены из меди специальные электроподводящие цепи и узлы разводки к ГВИТ от сети и от ГВИТ к оснастке на станке для осуществления ЭПРВыт. В таблице приведены изменения наружного диаметра заготовки и ее длины по переходам в ходе выполнения новой интенсивной технологии ЭПРВыт, которая была осуществлена практически без единого брака. При этом, как показано в таблице 1, диаметр заготовки уменьшался, а ее длина возрастала на сотни процентов.

Таблица 1

№ прохода	1	2	3	4	5	6	7
$\varnothing_{\text{наруж.}}$ , мм	82,75	82,35	81,8	81,3	80,8	80,28	80,05
Длина L, мм	114	131	156	194	250	345	460

Как показали последующие механические испытания, предел прочности  $\sigma_b$  материала обечаек увеличился на 10–11,6 %. Относительное удлинение также увеличивалось на 18–20 %.

Главный же результат состоял в том, что абсолютная величина удлинения заготовки обечайки в процессе ЭПВыт увеличилась на сотни процентов и на конечном размере составляла 450–460 %, что раньше было недостижимо без применения промежуточных отжигов.

Чистота поверхности обечаек после ЭПВыт соответствовала восьмому классу точности. Полный технологический цикл вытяжки обечайки составлял 3 ч 40 мин. Он включал в себя машинное время 1 ч 20 мин и вспомогательное время 2 ч 20 мин.

При металлографических исследованиях было установлено, что структура металла всех образцов была однородной и состоящей из равноосных зерен твердого раствора с признаками пластической деформации. Выделения избыточных фаз были распределены равномерно по объему и поверхности обечаек. Микротвердость образцов находилась в допуске. Склонности к межкристаллитной коррозии (МКК) не обнаруживалось.

Таким образом, при ротационной вытяжке рубашек  $\varnothing 80$  мм с применением источника импульсного тока ГВИТ мощностью 5 Квт у всех заготовок обечаек (всего, как указывалось, было изготовлено семь обечаек) было зафиксировано уменьшение наружного диаметра с  $\varnothing 82,9$  до  $\varnothing 80_{-0,05}$  и значительное увеличение длины (до 460 %), т. е. процесс пластической деформации наблюдался в полном объеме на сотни процентов без операций промежуточных отжигов. Обечайки имели конечную толщину стенок 0,5 мм. На один шарик приходилось примерно 200 А амплитудной силы тока.

Порядок проведения электропластической вытяжки следующий:

1. Заготовку обработанную под размеры оправки устанавливают в приспособления на станке и надвигают суппорт станка вместе с матрицей шариков на начало заготовки;
2. Включают станок и подачу тока от генератор ГВИТ в момент начала деформации заготовки;
3. За один проход деформирование осуществляют на величину до 30 % от исходной толщины стенки;
4. Проводится 8–10 проходов без промежуточных отжигов с постепенным утонением заготовки обечайки до толщины 0,5 мм;
5. После осуществления последнего прохода производится стабилизирующая термообработка в вакууме для аустенизации заготовки и снятия механических напряжений.

Схема электрическая

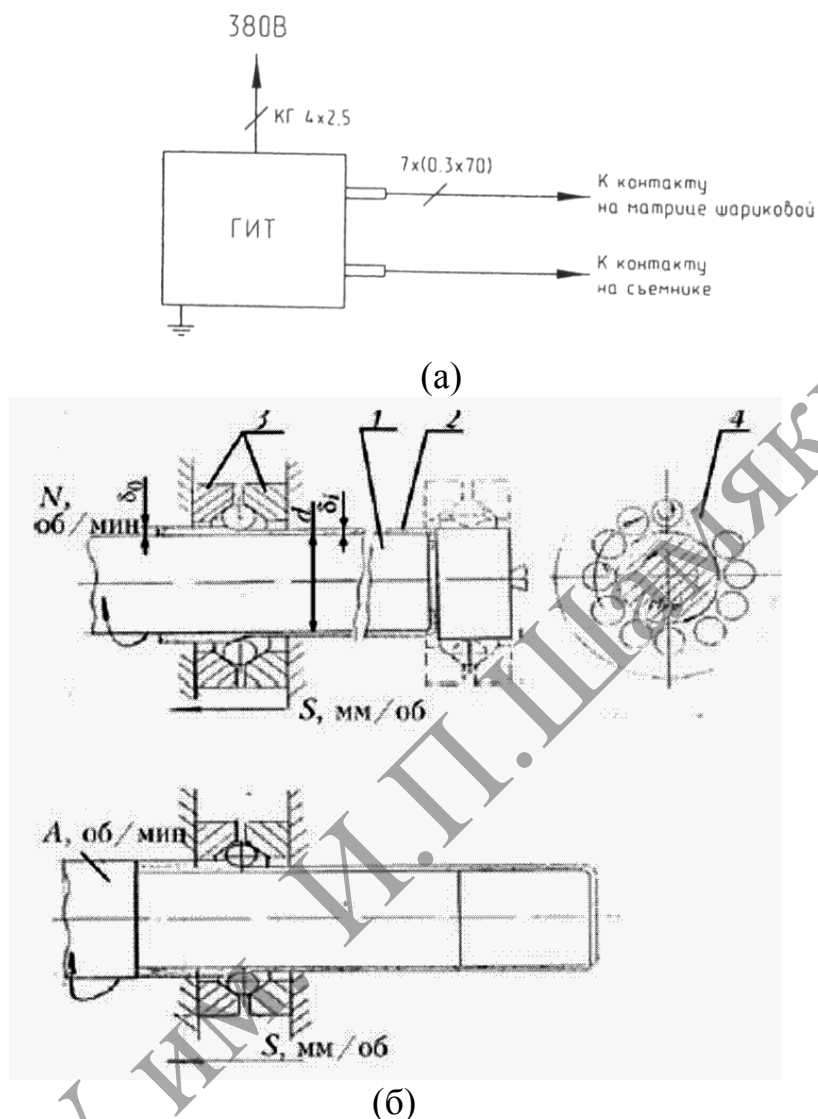


Рисунок 8. – Схема подключения генератора (а) и схема электропластической ротационной вытяжки металла (б): прямой и обратной. 1- пуансон; 2 – деталь; 3- опорные кольца; 4 – шарики

Результатом данной технологии явилось получение готовой детали с характеристиками, требуемыми чертежом.

Предел прочности  $\sigma_b$ , при  $t=20^\circ\text{C}$ , по сравнению со стандартной технологией был больше на 11,6 %. Относительное удлинение на 20 % больше, чем при традиционной ротационной вытяжке. Чистота поверхности после вытяжки соответствовала по параметру  $R_a$  1,6 мкм согласно чертежу детали. Полный технологический цикл вытяжки рубашки составил 3 ч 40 мин, который включает в себя машинное время 1 ч 20 мин и вспомогательное время 2 ч 20 мин.

При металлографических исследованиях образцов было установлено, что структура металла всех образцов однородна, представлена равноосными

зернами твердого раствора без признаков пластической деформации, выделение избыточной фазы распределены равномерно. Микротвердость образцов была в допуске. Склонности к межкристаллитной коррозии (МКК) металлографическим способом не обнаружено.

Механизм сохранения структуры и небольшого упрочнения металла при ротационной вытяжке рубашек в режиме электропластической ротационной вытяжки при спиральном перемещении шариковой оснасткой объясняется минимальными нагрузками каждого отдельного шарика на свою зону металла со сдвигом под некоторым углом. Указанное обстоятельство обеспечивает, уходя от лобового сопротивления всей заготовки, вытягивание металла с помощью «электронного ветра», электронных волн и вибраций решетки за счет пинч-эффекта действия импульсного тока, роль которых состоит не столько в силовом деформировании, сколько в разблокировке скоплений дислокаций, снятия внутренних напряжений и предотвращении упрочнения обрабатываемого материала. Из набора деформирующих шариков с особой структурой электронных и фононных возбуждений вокруг них (движущихся зарядов, электроволн, а также решеточной вибрации) возникают своеобразные объёмные матрицы из восьмёрок, у которых в промежутках имеют место потенциальные поля меньшей плотности, в которые и затекает деформируемый верхний слой металла, не создавая значительных сопротивлений деформирующим шарикам. Указанная ситуация постоянно воспроизводится при импульсной подпитке шарикового инструмента и обрабатываемого материала электронными и фононными возбуждениями от генератора импульсного тока в зоне коллективной дробной деформации вытяжкой. При этом перед обоймой с деформирующими шариками вдоль заготовки перемещается волна («цунами») перемещаемого металла, что фиксировалось авторами экспериментально при остановках вытяжки в середине процесса.

Возможна дальнейшая интенсификация процесса вытяжки металла в скрещенных электромагнитных полях.

#### **4.2.4. Обычная электропластическая вытяжка металла**

Имеется определенный опыт осуществления обычной электропластической вытяжки цилиндров из нержавеющей стали, идущих на изготовления сильфонов, с помощью матрицы и пуансона. Матрица, выполненная из инструментальной стали в виде втулки, выступает в качестве обжимающего инструмента, а пуансон продавливают заготовку в виде цилиндра сквозь матрицу на проход с обжатием и одновременной вытяжкой. После этого по обычной технологии без тока заготовку отправляют на аутенизирующий отжиг и вновь подвергают вытяжке 14–16 раз. Энергетические затраты на отжиг большие, и происходит большая затрата времени.

Модернизация пресса под технологию ЭПВыт состоит в установке под матрицу изолирующей толстой текстолитовой плиты с отверстием для выхода готовой продукции и в установке электрического контакта на верхнюю часть пуансона в виде хомута из толстой медной шины, к которой подключается минус источник тока – генератора униполярных импульсов тока (ГУИТ). Плюс источника тока подключается к матрице.

Процесс ЭПВыт осуществляется следующим образом. Сначала заготовка, смазанная мылом, одевается на пуансон и вводится в контакт с матрицей. После начала продавливания (через 1–2 сек) включается рабочий ток и в течение 10–15 сек происходит ЭПВыт заготовки. Рабочий ток выключается за 1–2 сек до окончания вытяжки, что обеспечивает отсутствие прижогов на инструменте.

Использовался электрический режим с  $J_m = (2 \div 3) \cdot 10^3$  А,  $\tau = 200$  мксек и  $F = 103$  Гц. С учетом толщины стенок заготовки 0,7 мм и исходного диаметра 14 мм амплитудная плотность тока  $J_m$  составляла величину порядка  $500$  А/см<sup>2</sup>, что достаточно для осуществления электропластической деформации нержавеющей стали.

В качестве контрольных опытов параллельно с цилиндрами, проходящими ЭПВыт, проводилась обычная вытяжка цилиндров из этой же партии без тока. В итоге было установлено, что под влиянием пластифицирующего тока вытяжка увеличивается на десятки процентов. Заготовки, прошедшие ЭПВыт, не нуждались в проведении аустенизирующего отжига. В них в процессе ЭПВыт было подавлено аустенитно-мартенситное и структурно-фазовое превращения ( $\gamma - \alpha -$  превращение). Они практически не реагировали на подносимый сильный магнит, поскольку содержали в себе в основном немагнитную  $\gamma$ -фазу (аустенит) и имели г.ц.к. решетку.

В отличие от них контрольные образцы цилиндров из той же партии, проходившие обычную вытяжку, сильно притягивались к магниту в силу большого содержания в них  $\alpha$ - фазы (мартенсита деформации), которая является магнитной и имеет о.ц.к. решетку.

При ротационной вытяжке рубашек  $\varnothing 80$  мм с применением источника импульсного тока ГВИТ N=5 КВт у всех семи заготовок было зафиксировано уменьшение наружного диаметра с  $\varnothing 82,9$  до  $\varnothing 80_{-0,05}$  и значительное увеличение длины заготовок до 450%, т.е. процесс пластической деформации наблюдался в полном объеме.

Чистота поверхности, полученная после вытяжки у всех семи заготовок, соответствовала требованиям. Совмещение ЭПЭ с ротационной вытяжкой позволило сократить технологический цикл вытяжки для данного типоразмера –  $\varnothing 80$  мм с 4–5 дней до 1 дня (включая термообработку детали) и сокращен с 4–5 дней до 1 дня.

При обычной электропластической вытяжке цилиндров из нержавеющей стали, идущих на изготовление сильфонов, подавлялось аустенино-мартенситное превращение и отпадала необходимость в проведении промежуточных операций.

### **4.3. Применение импульсов тока для формирования механических колебаний в металлических образцах**

Обеспечение прочности металлических конструкций в условиях эксплуатации под действием меняющихся во времени: температуры, коррозии, электрического тока, статических и динамических нагрузок имеет важнейшее техническое значение. Как правило, в рамках одной работы вопросы прочности и воздействия вибрационных динамических нагрузок рассматриваются независимо [1]. Аналогичная ситуация складывается при исследовании воздействия статических и динамических нагрузок, которые в большинстве случаев выполняются независимо друг от друга. Однако, имеются публикации, где отмечено, что одновременное воздействие статических и динамических сил приводит к синергизму, когда суммарный эффект воздействия превышает сумму эффектов от их независимого действия отдельных факторов воздействия [2]. Исследования на прочность при динамических воздействиях наиболее распространены, примером чего является вибрация. При сложном характере воздействия, например, при одновременном действии низкочастотной и высокочастотной вибраций [2], при воздействии случайных или полигармонических нагрузок [3] срок работы образцов до повреждения и разрушения сокращается более чем в 3 раза. Внешние факторы оказывают существенное влияние на циклическую прочность материалов [4–7] при длительной их эксплуатации. Поэтому комплексные испытания материалов является актуальными для реальной оценки прочности и влияния различных факторов на процессы разрушения.

Одним из способов задания динамических нагружений в процессе испытаний металлических образцов является пинч-эффект, возникающий при прохождении импульсов тока по проводнику [8]. Импульсы электрического тока при прохождении через элементы конструкции могут не только оказывать влияние на свойства металла, но и сами стать источником статических и динамических механических напряжений [9].

Применение ударных вибростендов для формирования ударного воздействия [10] не всегда возможно или удобно.

Типичным примером необходимости оценки целостности конструкции в собранном виде является контроль качества сборки обмоток мощного энергетического оборудования, например, изолированных шин обмотки статора генератора, укладываемых в пазы и закрепляемых текстолитовыми клиньями. Воздействие внешних ударов на элементы обмотки в этом случае недопустимо из-за возможного повреждения изоляции. Возбуждение нормированных по величине колебаний в элементах обмотки за счет

пропускания по ним кратковременных импульсов электрического тока, на который они рассчитаны, позволяет решить данную задачу. Изучение спектрального состава вибрационного отклика позволяет определить наличие дефектов в сборке обмотки. Большое количество шин в статоре мощных генераторов при применении описанной методики позволяет существенно сократить объем контрольных работ при изготовлении или ремонте подобного оборудования. Пропускание коротких импульсов тока при таких испытаниях позволяет одновременно провести контроль качества изоляции отдельных шин и таким образом уже на этой стадии сборки локализовать области изоляции с повышенной утечкой.

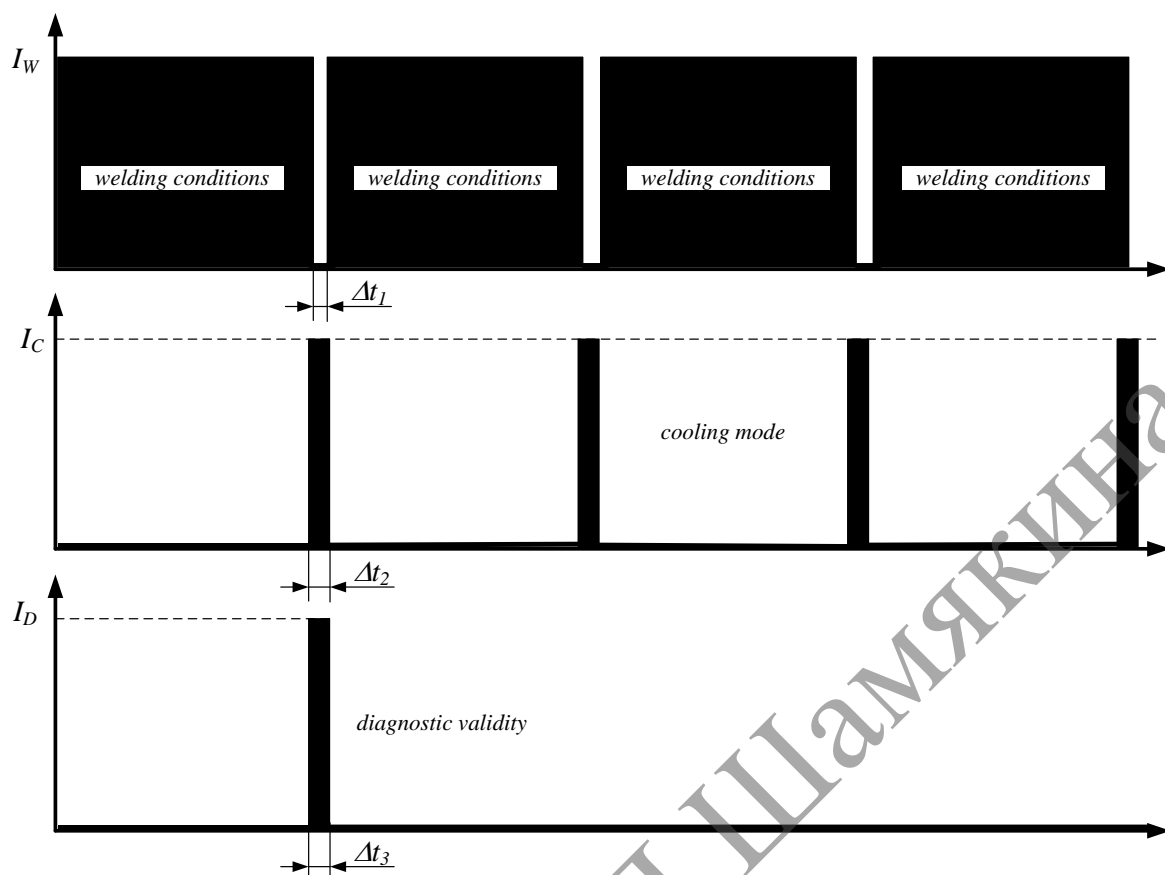
Оценка механического состояния элементов мощного электрооборудования обычно выполняется по результатам измерения собственных частот элементов конструкции [11].

#### 4.4. Одновременное действие тепловых и пандеромоторных эффектов

Комбинированное действие нагрева импульсными токами и формирование при этом ультразвуковых колебаний, улучшающих структуру металла в зоне сварки, рассмотрено, например в [12].

При действии импульсного тока, для исключения влияния нагрева образцов под действием тока исследовалось воздействие одиночных импульсов. Нагрев образцов от таких одиночных импульсов был пренебрежимо мал. Полученные при этом результаты показывают, что генерация механических колебаний в проводнике связана с прохождением переднего и заднего фронтов импульсов. Повторяющееся действие импульсов большой плотности может вызывать значительный нагрев проводника. Тепловое действие тока высокой плотности используется при электросварке. Симметричный характер виброакустического отклика на действие переднего и заднего фронта импульса тока позволяет за счет изменения скважности импульсов обеспечить сходное вибрационное воздействие при большом среднем уровне тока, вызывающем сильный нагрев, достаточный для выполнения сварки, а также режим регулируемого остывания с воздействием коротких импульсов, как это показано на рисунке 9. Действие одиночных импульсов тока, генерирующих механические колебания, позволяет реализовать режим неразрушающего диагностического контроля сварного соединения. В режиме сварки импульсы тока амплитудой  $I_w$  разделены относительно короткими интервалами отсутствия тока  $\Delta t_1$ .





**Рисунок 9. – Управление амплитудой импульсов тока, их частотой и длительностью позволяет в широких пределах изменять режимы сварки, охлаждения и диагностики с обеспечением максимального размаха механических колебаний**

В режиме регулируемого охлаждения импульсы тока  $I_C$  имеют относительно малую длительность  $\Delta t_2$ . Сходные характеристики имеют и одиночные импульсы тока с амплитудой  $I_D$  и длительностью  $\Delta t_3$ , используемые для неразрушающего контроля качества сваренной конструкции.

Сложение колебаний обеспечивает наличие области, где амплитуда может как значительно увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от соотношения их фаз. Работа с такими длительностями позволяет получить максимальный размах высокочастотного механического воздействия на область сварного соединения.

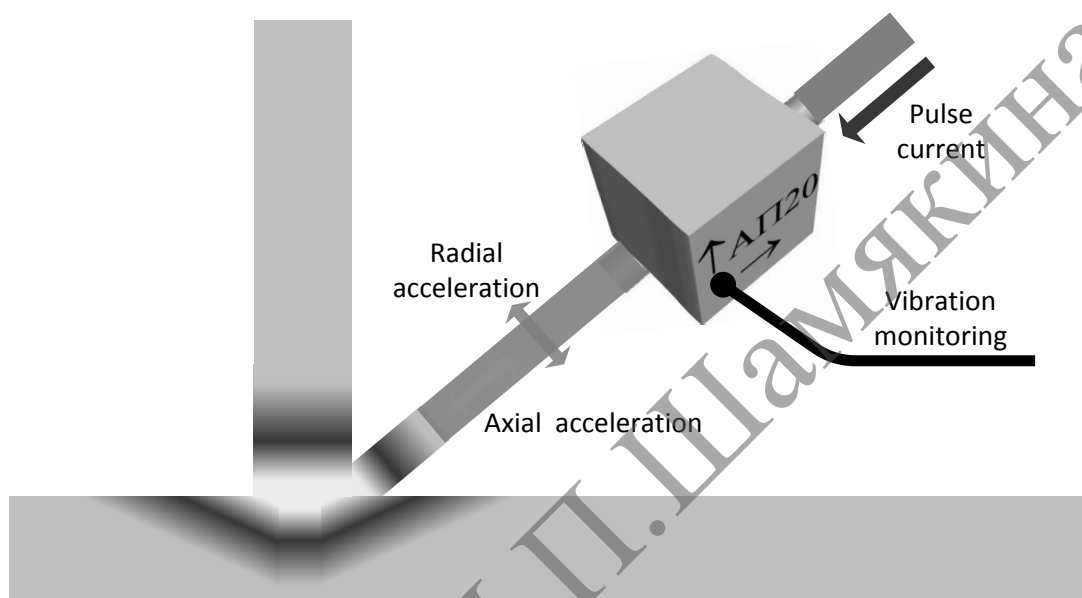
Выбор длительности токового импульса или интервала между окончанием и началом соседних импульсов позволяет обеспечить существенное увеличение амплитуды виброакустического отклика при существенно разном выделении тепла. Этот эффект связан с симметричным характером вибрационного отклика на прохождение как переднего, так и заднего фронтов импульсов тока через область сварки.

**ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА:**

- Амплитуда тока  $I_{max}$
- Частота импульсов  $F=1/T$  ( $T$ -период)

- Длительность импульсов  $T_w$
- Скважность импульсов  $W=(T_w/T)\cdot 100\%$
- Размах ускорения  $A_{\text{pik-to-pik}}=A_{\text{max}}-A_{\text{min}}$
- Скорость затухания виброакустических колебаний или декремент затухания.

Контроль виброакустического отклика может выполняться с использованием обычного малогабаритного акселерометра, устанавливаемого на электроде, с помощью которого выполняется сварка, как показано на рисунке 10.



**Рисунок 10. – Возбуждение вибрации электрода импульсным током в режиме сварки**

При малой длительности импульсов тока может быть выполнено охлаждение области сварки в условиях виброакустического воздействия для улучшения качества металла в области сварного соединения и снижения остаточных напряжений.

Процесс улучшения качества сварных соединений при воздействии ультразвука [13] можно совместить с процессами сварки, управляемого охлаждения и диагностического контроля. Это может быть выполнено использованием импульсного режима задания тока сварки. Возбуждаемые при этом механические колебания можно регулировать в широких пределах [14]. Контроль виброакустического процесса с использованием акселерометра, устанавливаемого на электроде, позволяет оптимизировать режим сварки, охлаждения, а также провести диагностику качества шва.

Отклик образца на пропускание импульса тока может быть разделен на две области. В первой при пропускании импульса тока происходит возбуждение деформаций и перераспределение тока под действием изменений магнитного поля, создаваемого этим током. Во второй временной области в образце наблюдаются собственные затухающие колебания. Такие

колебания могут быть использованы для выполнения неразрушающего контроля.

Возможными применениями формирования деформаций в проводах под действием импульсных токов – удаление налипания льда на линии электропередач. В настоящее время такое налипание устраняют нагревом проводов [15], что не всегда достаточно эффективно.

Проявление пандеромоторного действия импульсного тока находит применение и в других областях, например в медицинской технике при работе с металлическими имплантатами [16].

### **Использованная литература:**

1. Sofronas, Anthony. Case histories in vibration analysis and metal fatigue for the practicing Engineer. JohnWiley&Sons, Inc., 2012. – 295 p.
2. Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
3. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.
4. Левин, Д.М. Гигацикловая усталость / Д.М. Левин, И.Ф. Широкий, Л.В. Муравлева // Известия ТулГУ. Серия Физика. – 2006. – Вып. 6. – С. 192–201.
5. Арутюнян, А.Р. Коррозионный рост трещин и усталостная прочность сложных технических систем / А.Р. Арутюнян, Р.А. Арутюнян // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 9. – С. 42–48.
6. Баширов, И.В. Разрушение технологических трубопроводов при одновременном воздействии циклических и вибрационных нагрузок на резонансной частоте / И.В. Баширов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 4. – <http://www.ogbus.ru>, [http://ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV_1.pdf). – С. 1–10.
7. Коссов, В.С. Учет гигацикловой усталости сталей при оценке срока службы ответственных деталей железнодорожной техники / В.С. Коссов, В.Н. Огуенко, В.В. Огуенко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы докладов 67 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2007. – С. 66–67.
8. Троицкий, О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом./ О.А. Троицкий // Изв. АН СССР. – 1977. – № 6. – С. 118–122.
9. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства): монография / О.А. Троицкий [и др.] – М.: Изд-во АНО ИКИ (Москва–Ижевск), 2004. – Т. I. – 563 с. – Т. II. – 467с.

10. ГОСТ Р 57210-2016 Вибрация. Руководство по выбору вибростендов. Оборудование для воспроизведения ударов. – 2016. – 16 с.
11. Гаврилов, С.Н. Эффективные свойства модели статора турбогенератора для определения спектра собственных частот / С.Н. Гаврилов, М.И. Румянцев, Ю.К. Петреня // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 53–57.
12. Troickij, O.A. Ultrasonic Vibroacoustic Processes, Excited by Heating by Impulse Currents of Metals / O.A. Troickij, O.B. Skvorcov, V.I. Stashenko // New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application: 15th International School-Conference / KnowledgeE Life Sciences, 2017. – P. 549–555. DOI 10.18502/70.
13. Krajewski, A. Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminium alloys / A. Krajewski, W. Włosiński, T. Chmielewski, P. Kołodziejczak. // Bull. Pol. Ac. – 2012. – Tech. 60(4). – P. 841.
14. Динамическое возбуждение колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсных токов / О.А. Троицкий [и др.] // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – С. 137.
15. Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач / В.А. Соловьев [и др.] // Материалы IV Междунар. студ. науч. форума (электронная конференция). Комсомольск-на-Амуре, 2012. С. 1–45.
16. Troickij, O.A. Electroplastic Processing of Titanium Implants / O.A. Troickij, O.E. Korol'kov, V.I. Stashenko, O.B. Skvorcov // New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application: 15th International School-Conference / KnowledgeE Life Sciences, 2017. – P. 534–540. DOI 10.18502/68/.

# ГЛАВА V. ВЛИЯНИЕ СЕРИЙ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА ВЕЛИЧИНУ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЕФОРМИРОВАНИЮ

## 5.1. Методика эксперимента и полученные результаты

Исследования проводили на кристаллах Zn (99,998 %) длиной 50 мм, диаметром  $\sim 1$  мм с углом между плоскостью (0001) и осью растяжения  $\chi=22-24^\circ, 30^\circ$ . Кристаллы деформировались при  $78^\circ\text{K}$  в режиме ползучести на неустановившейся стадии. Точность измерения относительной деформации составила  $2 \cdot 10^{-5}$ . Деформация, вызванная парными импульсами тока, следующими как в одном, так и в противоположных направлениях  $\varepsilon_{и}$  многократно записывалась в течение 1 мин. Перед каждым новым включением импульсов за 30 с производилась догрузка кристалла на  $2 \cdot 10^4$  Па. Амплитудное значение плотности тока  $j_m$  длительность импульсов (по полувысоте)  $t_{и}$  и частота следования импульсов  $F$  сохранялись постоянными ( $j_m=250$  А/мм<sup>2</sup>,  $t_{и}=120$  мкс,  $F=100$  Гц). Величина деформации  $\varepsilon_{т}$ , вызванная тепловым действием тока, определялась с помощью переменного тока при эквивалентном нагреве. Степень нагретости образцов определялась дифференциальными медьконстантановыми термопарами. Величина нагрева образцов, деформируемых в жидком азоте, не превышала 1,5–2 К. Деформация, вызванная током за вычетом деформации от тепла, определялась как разность  $\Delta\varepsilon=\varepsilon_{и}-\varepsilon_{т}$ . Включение импульсного тока при пластической деформации сопровождается обычно скачком деформации, величина которого зависит как от структуры металла и величины, предшествующей деформации, так и от параметров тока, вида импульсов. Зависимость  $\Delta\varepsilon$  от  $t_{ф}$ , показанная на рис. 1, свидетельствует о влиянии на величину ЭПЭ лишь низкочастотных составляющих спектра импульса, где сосредоточено 95% полной его энергии [1–3].

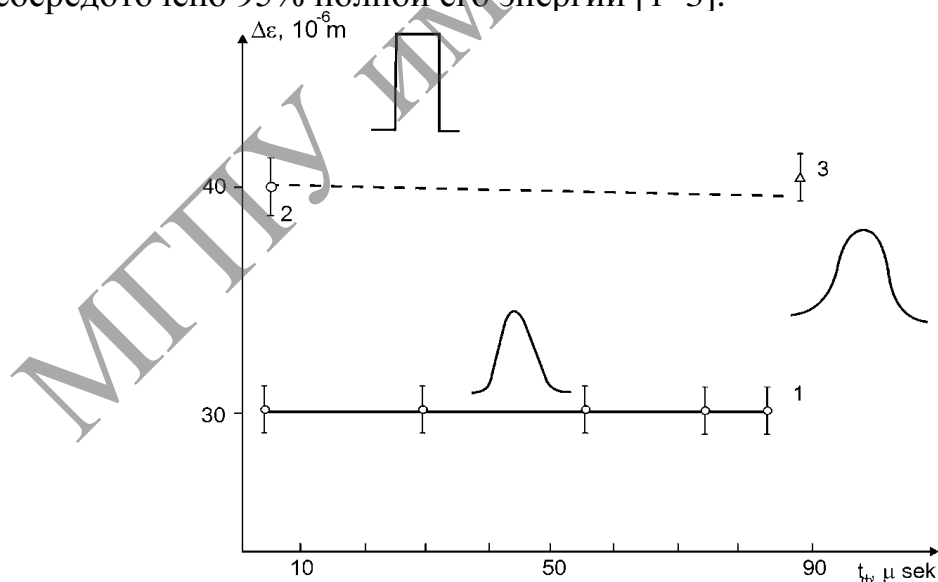
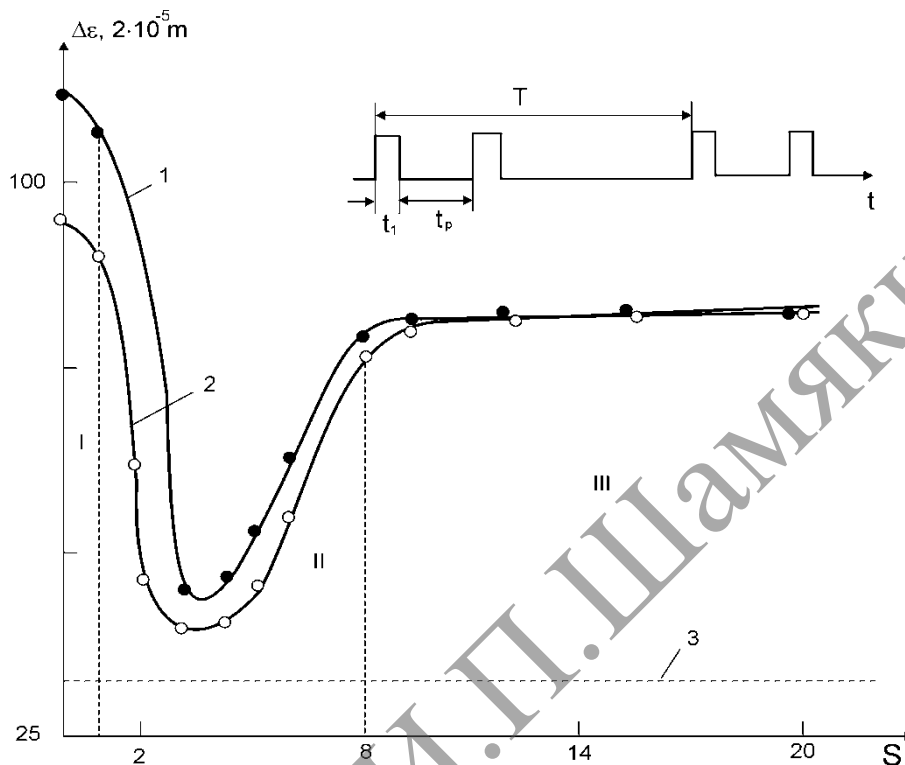


Рисунок 1. – Зависимость приращения деформации ползучестью  $\Delta\varepsilon$  от импульсов тока различной формы. Кривая 1 – влияние переднего фронта импульса  $t_{ф}$  треугольной формы; 2, 3 – влияние импульсов прямоугольной и колоколообразной формы

Группа из  $m$  импульсов с одинаковыми  $I_m$  и  $t_{и}$ , следующих друг за другом через одинаковые интервалы  $t_n$ , образуют серию. Значения  $\Delta\varepsilon$  в зависимости от интервала времени между импульсами пары  $t_n$ , отнесенного к длительности отдельных импульсов  $S=t_n/t_{и}$  при одинаковом и встречном направлениях импульсов в паре представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Зависимость приращения деформации ползучестью  $\Delta\varepsilon$ , вызванной импульсами тока различной формы, от длительности фронта импульсов.**

**Зависимость приращения деформации ползучестью  $\Delta\varepsilon$  от временного интервала  $t_{п}$  между импульсами в паре униполярных (кривая 1) и биполярных (кривая 2)**

**импульсов тока, отнесенного к длительности отдельных импульсов  $\tau_{и}$ , т.е. от  $S = \frac{t_{п}}{\tau_{и}}$ .**

**Кривая 3 – одиночные импульсы частотой 100Гц.**

Зависимости  $\Delta\varepsilon$  от  $S$  для парных импульсов одного направления (кривая 1) и противоположных направлений (кривая 2). Точки, по которым строились кривые, представляют собой средние арифметические значения измеренных деформаций  $\Delta\varepsilon$  со средней квадратической ошибкой  $\sigma=18\cdot 10^{-5}$ . Видно, что с увеличением  $S$  величина  $\Delta\varepsilon$  сначала уменьшается (кривая 1, 2), а затем возрастает, достигая значения при  $S=8$  меньшего, чем при  $S=0$ ; в дальнейшем значение  $\Delta\varepsilon$  сохраняется на одном уровне. Видно также, что парные импульсы противоположных направлений вносят меньший вклад в  $\Delta\varepsilon$ , чем импульсы одного направления. Это различие сохраняется вплоть до  $S=8$ . Затем направление импульсов становится несущественным. Линия 3 показывает зависимость  $\Delta\varepsilon$  от действия одиночных импульсов.

Как видно из этого графика (рис. 2), если  $m=2$ , а интервал  $t_n$  уменьшается и  $t_n < t_n$ , то действие пары импульсов приближается к действию одиночного удвоенной длительности (область I) [1-3]. При увеличении  $t_n$  характер действия импульсов меняется. При  $t_n > 8 t_n$  действие пары эквивалентно действию импульсов увеличенной частоты (область III). Аномальное поведение  $\Delta\varepsilon(S)$  при  $q$  от 2 до 8 можно объяснить на основе спектрального анализа, который длительное время применяется в радиотехнике [1, 3]. Суть его заключается в том, что любой импульсный процесс можно представить в виде простых гармонических составляющих и описать его спектральной функцией, которая характеризует форму импульсов независимо от частоты следования импульсов. Важнейшие гармонические составляющие определяют с необходимой степенью приближения форму импульса и эффект его воздействия. Они образуют спектр определенной ширины, где сосредоточена большая доля полной энергии импульса. Резкое уменьшение  $\Delta\varepsilon$  (II участок), а затем его увеличение связано, видимо, сначала с уменьшением, а затем с увеличением энергии в области частот двухимпульсного сигнала в силу изменения  $t_n$  из-за изменения плотности расположения лепестков в спектра двухимпульсного сигнала с увеличением  $S$ .

Интенсивность воздействия пары импульсов на пластическую деформацию зависит от расстояния между ними  $t_n$ . При  $t_n < 0,2 t_n$  интенсивность воздействия пары эквивалентна интенсивности действия одиночного импульса удвоенной длительности [1] с интенсивностью  $2I_m t_u$  (рисунок 2), а ток, действующий на образец одиночными импульсами удвоенной длительности, вызывает деформацию  $\Delta\varepsilon$ . При  $t_n > 0,2 t_n$  интенсивность воздействия уменьшается за счет влияния одного импульса на другой и достигает минимума при  $t_n \approx 3-4$  [1, 3]. Уменьшение интенсивности воздействия соответствует замедлению активационных процессов и уменьшению актов безактивационной пластической деформации, что ведет к уменьшению  $\Delta\varepsilon$ . При  $t_n > 3 - 4 t_n$  взаимное влияние одного импульса пары на другой уменьшается. В результате  $\Delta\varepsilon$  увеличивается. При  $t_n > 8-9 t_n$  влияние импульсов друг на друга исчезает, а ток действует на образец одиночными импульсами удвоенной частоты с интенсивностью  $I_m t_u$  и  $1/2F > t_0$ .

С увеличением  $m$  в спектре энергетического воздействия появляются «лепестки» распределения энергии разной интенсивности (рисунок 3). Дальнейшее увеличение  $m$  импульсов в серии сужает «лепестки», превращая их в линии. С увеличением числа импульсов в серии эффективность действия импульсов снижается по сравнению с действием первого импульса серии. Серией импульсов тока можно моделировать эквивалентность силового действия одиночного импульса тока нужной интенсивности. Необходимое число импульсов в серии и время пауз между сериями можно оценить, используя параметр времени элементарных актов пластической деформации металла и по условиям деформирования.

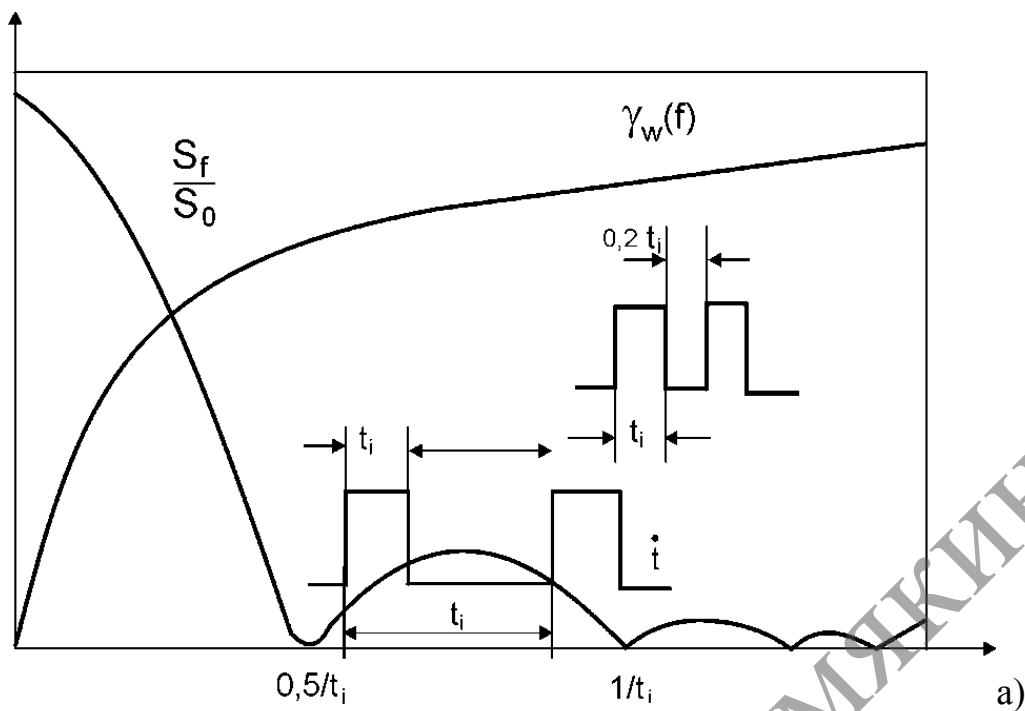


Рисунок 3а. – График амплитудного спектра двухимпульсного сигнала для случая  $2t = 4t_n$ ; а также интегральное распределение энергии  $\gamma_w(f)$  и изменение амплитудного спектра  $S_f/S_0$

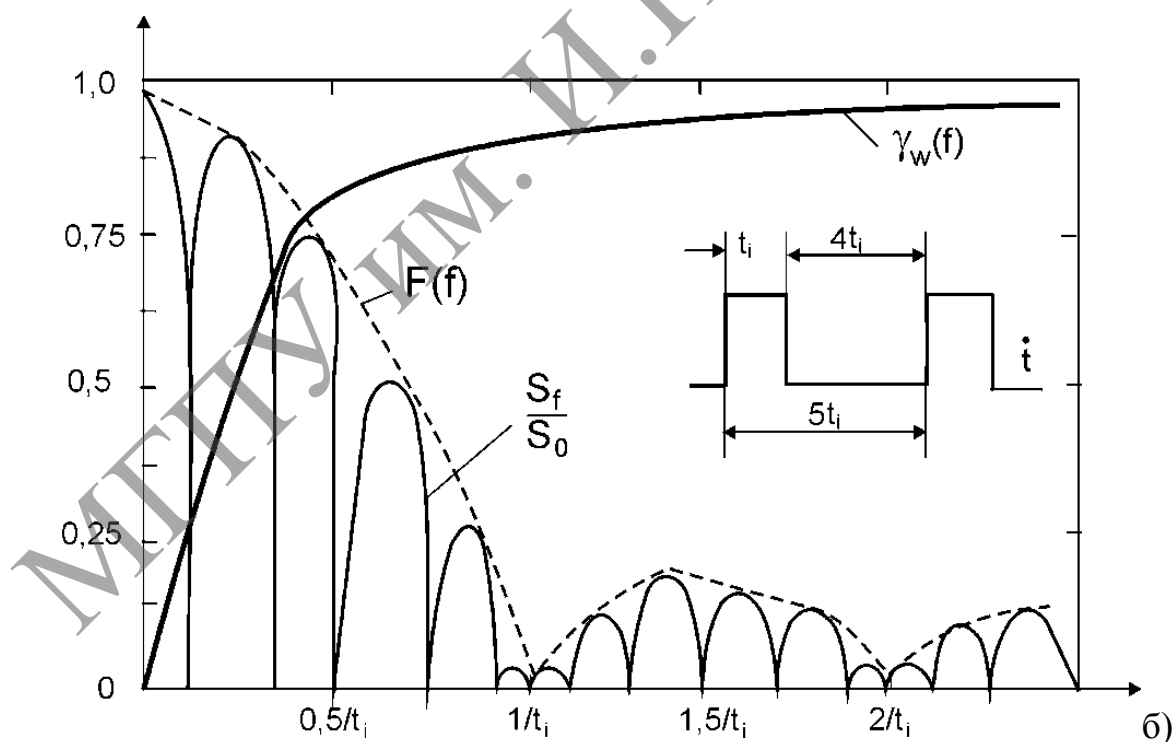


Рисунок 3б. – Деление энергетического спектра воздействия на «лепестки» малой и большей интенсивности,  $m=2$  ( $S_f/S_0$  – относительная величина модуля спектральной функции импульса)



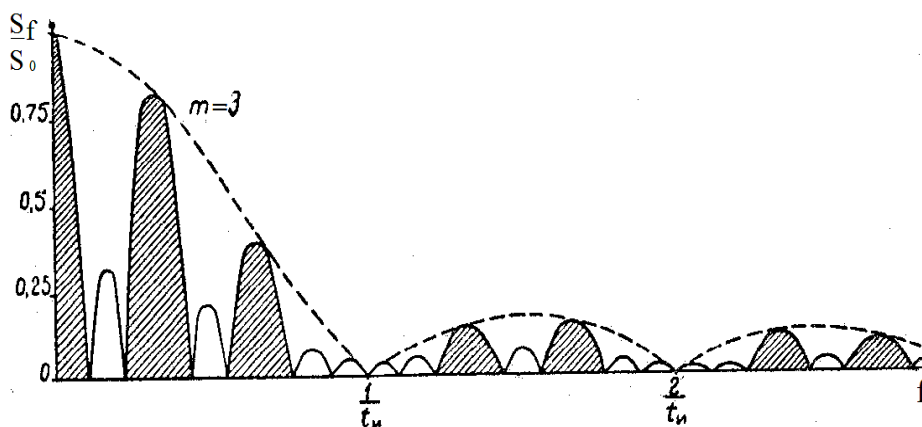


Рисунок 3в. – Деление энергетического спектра воздействия на «лепестки» при  $m=3$  ( $S_f/S_0$  – относительная величина модуля спектральной функции импульса)

Отмеченные особенности электропластического эффекта (ЭПЭ) естественно объяснить увлечением дислокаций электронами проводимости в направлении тока [4]. Однако действие тока на дислокации, участвующие в пластической деформации, не эквивалентно только применению к ним дополнительного механического напряжения [5]. Более значительный безактивационный вклад тока состоит в том, что под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от препятствий безактивационным путем, чему также способствует инерционный эффект Гранато [5, 6]. При этом резко возрастают силы, действующие на дислокации в направлении тока. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путем. К тому же это открепление затрудняется встречным током. При деформации происходит упрочнение материала, что препятствует появлению новых неравновесных групп дислокаций. Время формирования таких групп  $t_0$  [5] после микропластической деформации, вызванной очередным импульсом тока, с ростом общей деформации увеличивается.

## 5.2. Обсуждение результатов

Включение импульсного тока в процессе активной деформации образцов [6–9] или ползучести [10–12] приводят, как правило, к скачкообразному приращению деформации и связанному с этим скачку деформационного усилия. Зависимость этого эффекта от амплитуды  $I_m$  и длительности  $t_{и}$  носит пороговый характер [11, 12]. Порог по  $I_m$  лежит на уровне 250–400 А/мм<sup>2</sup> для различных металлов, а по  $t_{и}$  на уровне 50-100 мкс. Эффект увеличивается с ростом  $I_m$  и  $t_{и}$ , а также с ростом частоты тока [12]. Встречные импульсы могут мешать друг другу в их действии на пластическую деформацию металла [9, 11], а действие парных импульсов зависят от времени между импульсами в паре [1, 11].

Наибольшее действие импульсный ток оказывает к приходу каждого из последующих импульсов, когда появляются неравновесные группы дислокаций. Этому условию удовлетворяют только  $n$  первых импульсов тока. Разнесение импульсов и действие их сериями меняет энергетический и силовой характер импульсного тока на пластическую деформацию металла. Необходимое число импульсов в серии и время пауз между сериями можно оценить, используя параметр времени элементарных актов пластической деформации металла и по условиям деформирования.

Исследования серий импульсов тока из  $m > 2$  одинаковых по амплитудной плотности  $800 \text{ А/мм}^2$  следующих друг за другом частотой  $0,5 \text{ Гц}$ , и имеющих различную длительность  $t_{\text{и}} = 4 - 20 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ . Пондеромоторное и тепловое действия тока учитывались в отдельных контрольных опытах. Прямое доказательство нетеплового действия импульсов тока получено в [8, 13, 14] при исследованиях полярности действия тока на пластическую деформацию, в работах [11, 15–17] при корректном отделении эффекта от тепловой части действия тока. Деформация образцов (растяжением) периодически останавливается и в этот момент пропускается короткая серия импульсов. В результате возникает  $\Delta\sigma_{\text{эн}}$  (снижение деформирующего напряжения под действием серии импульсов тока). В образцах сохраняется дислокационная структура, отвечающая активной деформации, но вместе с тем устраняется основная причина инструментального эффекта – постоянное движение штанги машины. Такая методика позволяет избежать противоборства процессов активного нагружения и релаксации напряжений. При этом соблюдались следующее условие эксперимента:

$$T_n \gg t_1 > t_2 > t_c > t_{\text{и}}$$

$T_n$  – период повторения импульсов (серий импульсов);  $t_1$  – время, в течение которого происходит поднятие деформирующего усилия на прежний уровень ( $t_1 = \Delta_l/v$ ), где  $\Delta_l$  – приращение длины образца за серию импульсов,  $v$  – скорость движения штанги испытательной машины);  $t_2$  – время срабатывания инерционных звеньев машины, равное  $0,1 - 0,3 \text{ с}$ ;  $t_c$  – время элементарного скачка деформации, порядка  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ с}$ ;  $t_{\text{и}}$  – длительность одного импульса тока, равная  $\sim 10^{-4} \text{ с}$ .

Истинная величина скачков деформирующего напряжения находилась как

$$\Delta\sigma_{\text{эн}} = \Delta\sigma_{\text{пер}} + Kvt/S,$$

где  $\Delta\sigma_{\text{пер}}$  – регистрируемая величина скачков на диаграммах деформации;  $t$  – время, в течение которого происходит пластическая деформация образца под влиянием одного ( $t=t_c$ ) или серии из  $m$  импульсов ( $t=m \cdot t_c$ ),  $K$  – жесткость испытательной машины, Н/м.

Активная деформация осуществлялась на разрывной машине с жесткостью  $K=1,2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$  с точностью регистрации напряжений  $\pm 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и деформаций  $\pm 0,01\%$ . Использовался симметричный токоподвод.

Значительно сильнее проявляют себя серии из 10–20 импульсов, пропускаемые через деформируемый металл с достаточным интервалом времени для накопления незавершенных сдвигов [18].

Характерная диаграмма приведена на рисунке 4. Она демонстрирует большую величину электропластического эффекта (ЭПЭ)  $\Delta\sigma_{эн}$  при остановках растяжения в области В, когда машина была остановлена, чем на активном участке деформации в области А. Моменты включений тока показаны стрелками. С увеличением номера включения серий импульсов  $N$  (до 5) ЭПЭ ослабевает, что связано с истощением дислокационной структуры и падением приложенных напряжений. Эффект тем больше, чем больше  $t_{и}$ : например при  $t_{и} = 40$  мкс вызванное током суммарное значение  $\Delta\sigma$  при  $N=5$  сравнимо с  $\Delta\sigma$  без тока (за одно и тоже время релаксации напряжений), тогда как при  $t_{и} = 80$  мкс эффект в 7 раз, а при  $t_{и} = 200$  мкс в 12 раз больше, чем без тока.

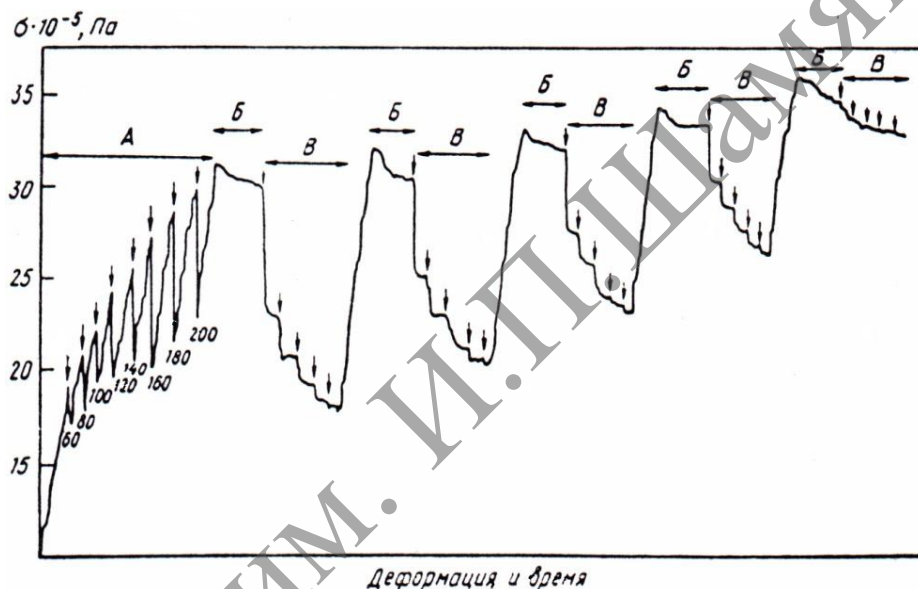


Рисунок 4. – Характерная диаграмма деформации кристаллов Zn с участками серии импульсов тока различной длительности

Была измерена также скоростная зависимость эффекта, установлено, что с увеличением  $\dot{\epsilon}$  происходит смещение зависимости  $\Delta\sigma_{эн} - \sigma_2$  в сторону большего разупрочнения под влиянием тока. Из выражения для скорости пластического течения  $\dot{\epsilon} \approx N_d b v_d$ , где  $N_d$  – число дислокаций и  $v_d$  – скорость дислокаций, следует, что  $\dot{\epsilon}$  может увеличиваться не только за счет приращения  $v_d$ , что отвечало бы теории [11, 17–19], но и за счет роста  $N_d$ . Об этом свидетельствует повышенная «память» кристаллов на действие импульсов тока: отношение времени  $t_1$  к  $t_{и}$  составляет  $10^4 - 10^6$  и отношение  $t_c$  к  $t_{и}$  является также большой величиной порядка  $10^2 - 10^3$ . Из этого следует, что импульсы тока не участвуют в скачках деформации до конца, а только стимулируют начало скачков.

### 5.3. Выводы

1. Электропластический эффект под влиянием серии импульсов тока имеет максимальную величину в момент остановки активной деформации кристалла при остановке испытательной машины. С увеличением номера включения серий импульсов  $N$  (до 5) ЭПЭ ослабевает, что связано с истощением дислокационной структуры и падением приложенных механических напряжений.

2. Встречные импульсы могут мешать друг другу в их действии на пластическую деформацию металла, а действие парных импульсов зависят от времени между импульсами в паре.

3. Действие тока на дислокации, участвующие в пластической деформации, не эквивалентно только применению к ним дополнительного механического напряжения. Более значительный безактивационный вклад тока состоит в том, что под влиянием импульсов тока наиболее неравновесные группы дислокаций положительного знака открепляются от препятствий безактивационным путем, чему также способствует инерционный эффект Гранато [5, 6]. При этом резко возрастают силы, действующие на дислокации в направлении тока. Группы же дислокаций отрицательного знака открепляются от стопоров только термофлуктуационным путем. К тому же это открепление затрудняется встречным током.

4. Необходимое число импульсов в серии и время пауз между сериями можно оценить, используя параметр времени элементарных актов пластической деформации металла и по условиям деформирования.

5. Парные импульсы противоположных направлений вносят меньший вклад, чем импульсы одного направления. Это различие сохраняется вплоть до числа импульсов  $S=8$ . Затем направление импульсов становится несущественным. Импульсы тока в серии, как правило, не участвуют в скачках деформации до конца, а только стимулируют начало скачков.

6. Целесообразно использовать методику, позволяющую избегать противоборства процессов активного нагружения и релаксации напряжений в образцах, чтобы соблюдались следующие условия

$$T_n \gg t_1 > t_2 > t_c > t_n$$

где  $T_n$  – период повторения импульсов (серий импульсов);  $t_1$  – время, в течение которого происходит поднятие деформирующего усилия на прежний уровень ( $t_1 = \Delta_l/v$ ), где  $\Delta_l$  – приращение длины образца за серию импульсов,  $v$  – скорость движения штанги испытательной машины);  $t_2$  – время срабатывания инерционных звеньев машины, равное 0,1–0,3 с;  $t_c$  – время элементарного скачка деформации, порядка  $10^{-3}$  –  $10^{-2}$  с;  $t_n$  – длительность одного импульса тока, равная  $\sim 10^{-4}$  с.

## Использованная литература:

1. Иццоки, Я.С. Импульсные устройства / Я.С. Иццоки. – М.: Советское радио, 1959. – 782 с.
2. Иццоки, Я.С. Импульсные и цифровые устройства / Я.С. Иццоки, Н.И. Овчинников. – М.: Советское радио, 1973. – 325 с.
3. Фикс, В.Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках / В.Б. Фикс. – М.: Наука, 1969. – 295 с.
4. Троицкий, О.А. Исследование электропластической деформации металла методом релаксации и ползучести / О.А. Троицкий, В.И. Спицын // Докл. АН СССР. – 1976. – Т. 226. – С. 1388–1399.
5. Предводителев, А.А. Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах / А.А. Предводителев, О.А. Троицкий. – М.: Атомиздат, 1973. – 198 с.
6. Granato, O. Dislocation inertial model for the increased plasticity of the superconducting state / O. Granato // Phys. Rev. Lett. – 1971. – Vol. 27. – P. 660–665.
7. Троицкий, О.А. Электропластическая деформация металла / О.А. Троицкий, А.Г. Розно // ФТТ. – 1970. – Т. 12. – С. 203–210.
8. Троицкий, О.А. // Письма ЖЭТФ. – 1969. – Т. 10, № 1. – С. 18–20.
9. Троицкий О.А., Спицын В.И., Калымбетов П.У. // ДАН. – 1980. – Т. 253, № 3. – С. 638.
10. Троицкий, О.А. Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта./ О.А. Троицкий, В.И. Спицын, В.И. Стащенко // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 256. – С. 1134–1137.
11. Стащенко, В.И. Влияние частоты импульсного тока и внешнего механического напряжения на скорость ползучести кристаллов / В.И. Стащенко, О.А. Троицкий // Физика металлов и металловедение. – 1982. – Т. 53. – С. 180–184.
12. Троицкий, О.А. Влияние длительности импульсов тока на скорость ползучести кристаллов цинка / О.А. Троицкий, В.И. Стащенко, В.И. Спицын// Изв. АН СССР. Сер. Металлы. – 1982. – № 1. – С. 164–168.
13. Троицкий О.А., Спицын В.И., Стащенко В.И. // ДАН. – 1978. – Т. 241, № 2. – С. 349–352.
14. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилов В.Ф., Гуревич Л.И. // ДАН. – 1978. – Т. 239, № 1. – С. 84–86.
15. Стащенко, В.И. Влияние амплитуды импульсного тока на скорость ползучести кристаллов цинка./ В.И. Стащенко, О.А. Троицкий // Пробл. Прочности. – 1982. – № 10. – С. 46–49.

16. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. // Scr. Metall. – 1978. – V. 12. – P. 1063–1068.
17. Silveira V.L.A., Porto M.F.S. // Ibid. – 1981. – V. 15. – P. 945–950.
18. Троицкий О.А., Моисеенко М.М., Спицын В.И. // ДАН. – 1984. – Т. 274, № 3. – С. 587–590.
19. Фикс, В.Б. Увлечение и торможение подвижных дефектов в металлах электронами проводимости. Роль закона дисперсии электронов / В.Б. Фикс // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1981. – Т. 80. – С. 1539–1542.

МГТУ им. И.П.Шамякина

## ГЛАВА VI. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

При действии коротких импульсов тока высокой плотности (порядка ~ деформирующего напряжения в металлах на десятки процентов [1, 2], а по данным [3], полученным методом двойного травления, увеличивается подвижность дислокаций при токовом воздействии. Облегчение пластической деформации и улучшение механических свойств металлов с успехом используются в различных технологиях обработки металлов и сплавов давлением. Очевидно, что электропластическое действие импульсов тока носит комбинированный характер. К механизмам электропластической деформации (ЭПД) относят:

- давление и увлечение «электронным ветром» зон пластической деформации, одиночных и скоплений дислокаций [1–2, 4];
- появление сил электрон-фононного увлечения точечных дефектов и дислокаций в процессе электропластической деформации металла (ЭПДМ) [5,6];
- влияния вибраций кристаллической решетки за счет действия динамического пинч-эффекта [7–9] на деформируемый металл;
- возможно также действие спинового разупрочнения металла (СРМ) за счет влияния на механические свойства твердого тела электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [10, 11].

Для реализации СРМ как нового и еще малоизвестного явления в кооперативном эффекте ЭПД необходимо, чтобы магнитное поле импульсного тока и внешнее магнитное поле СВЧ-излучения были скрещены. Кроме того образцы должны находиться в условиях активной деформации растяжением или сжатием с постоянной скоростью, или в состоянии релаксации напряжений без снятия нагрузки для того, чтобы в них генерировались и по возможности накапливались свежие дислокации. Экспериментальное доказательство наличия подобного эффекта впервые было получено Головиным и Моргуновым [12] на ионных кристаллах. На металлах этот эффект был обнаружен О.А. Троицким и В.И. Сташенко в последние два года. В настоящей главе рассматривается влияние СВЧ-излучения на пластическую деформацию металла в условиях действующих одновременно с СВЧ-излучением импульсов электрического тока, что подтверждает наличие СРМ.

### 6.1. Выбор волны электромагнитного СВЧ-излучения

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов в условиях пластической деформации растяжением и действии импульсов тока, была выбрана частота 2,45 ГГц, применяемая в микроволновых СВЧ печах [13].

В микроволновых печах используются только прямоугольные волноводы. Конфигурация поля в волноводе может иметь очень сложную форму. Теория дает механизм, позволяющий свести сложную структуру поля к набору относительно простых типов, из которых, при желании, можно воссоздать любую конфигурацию существующих в волноводе полей. Распространяемые по волноводу электромагнитные волны условно можно разделить на два основных типа. Волны, имеющие составляющую электрического поля вдоль направления распространения и не имеющие магнитной, относятся к E-типу. И наоборот, волны, имеющие магнитную составляющую вдоль направления распространения и не имеющие электрической, относятся к H-типу. Селекцию типов можно осуществить подбором размеры  $a$  и  $b$ , чтобы распространялись только нужные типы волны (рис. 1).

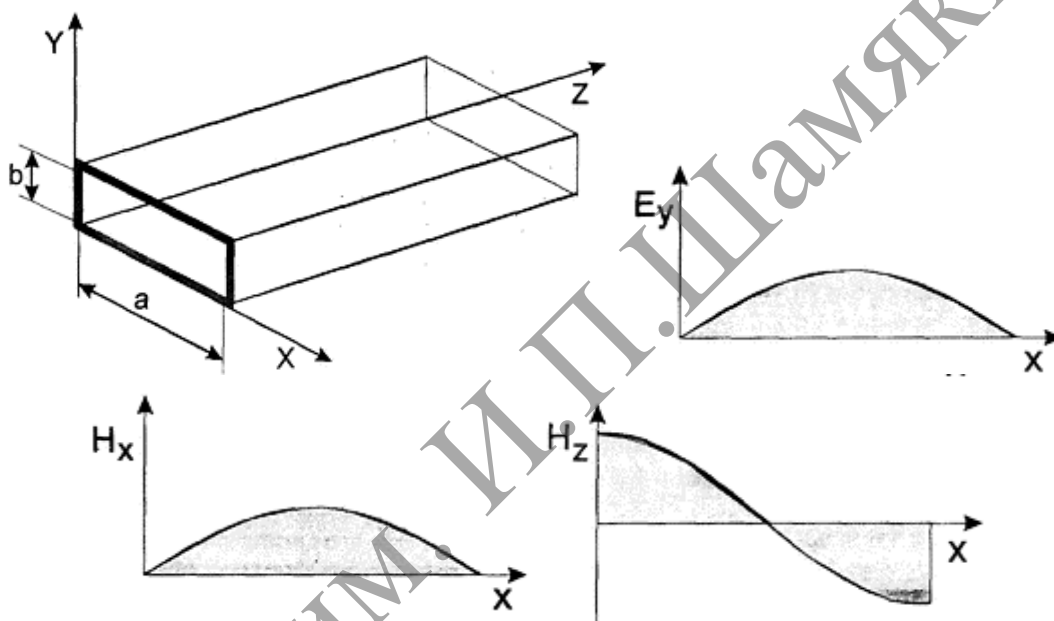


Рисунок 1. – Структура электромагнитного поля в прямоугольном волноводе для волны типа  $H_{10}$

На практике в качестве рабочих волн обычно используются волны типа  $H_{10}$ . Равенство нулю второго индекса в названии волны  $H_{10}$  говорит о том, что вдоль узкой стенки поле не меняется. Следует обратить внимание на то, что отсутствует не само поле, а лишь его изменение. Таким образом, размер  $b$  не влияет ни на структуру распределения полей в волноводе, ни на его критическую частоту. Столь тщательное рассмотрение этого типа не случайно, поскольку он является основным для прямоугольного волновода. Можно даже сказать, основным в квадрате, поскольку, во-первых, это рабочий тип волны для подавляющего большинства задач, в частности, именно этот тип используется в микроволновых печах, а во-вторых, он основной по определению.



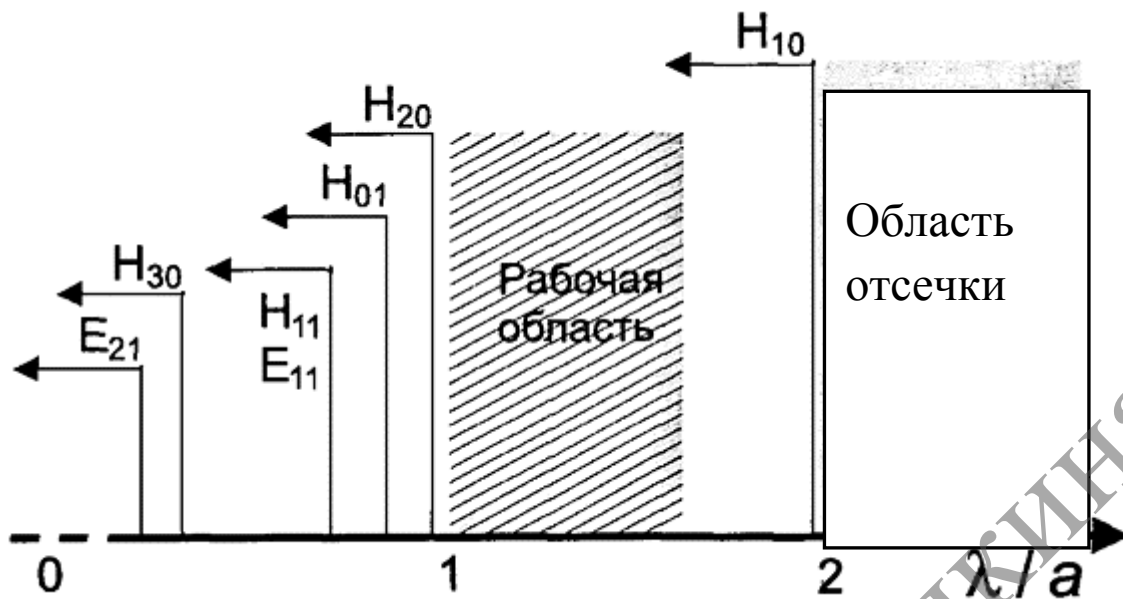


Рисунок 2. – Диаграмма распределения критических длин волн, наиболее близких к основному типу

Типичная конструкция подключения магнетронного генератора к волноводу показана на рисунке 3а.

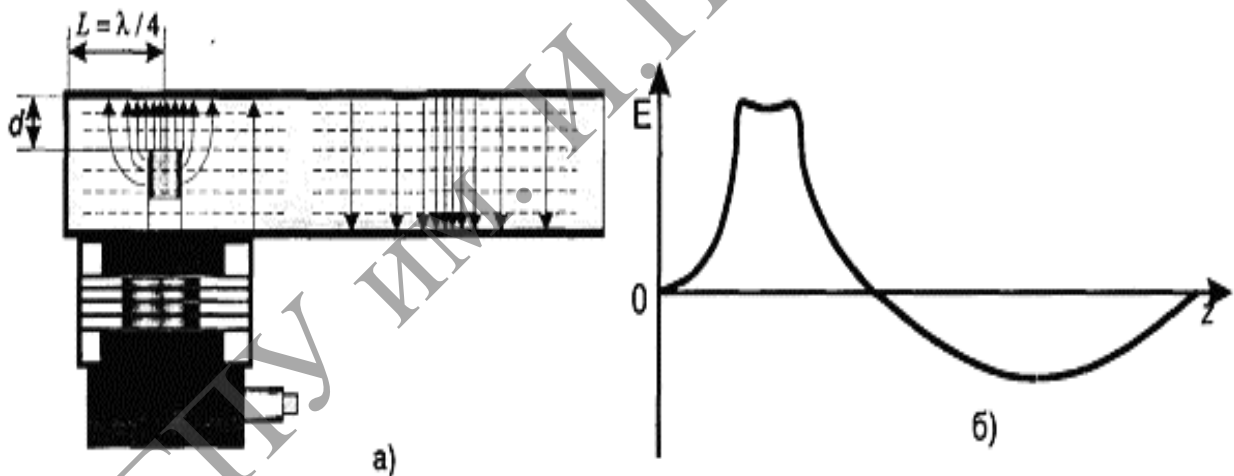


Рисунок 3. – Подключение магнетрона к волноводу (а) и распределение напряженности электрического поля по длине  $Z$  волновода (б)

## 6.2. Передача электромагнитного излучения от источника

В работе передачу электромагнитного (ЭМ) излучения от источника СВЧ-излучения – магнетрона к деформируемому образцу осуществляли с помощью волновода прямоугольного сечения. ЭМ энергия излучалась магнетроном с помощью антенны в виде электрического штыря. Штырь входил в волновод и располагался на расстоянии примерно в четверть длины волны  $\lambda$ . Прямоугольный волновод с одной стороны был закорочен металлической стенкой. Штырь магнетрона излучал электромагнитные

волны (ЭМВ) во всех направлениях – прямые в направлении нагрузки (деформируемого образца) и обратные в противоположном направлении к глухой стенке волновода, которые после отражения складывались (рисунок 3а). Для стандартных волноводов должно выполняться соотношение  $b/a < 0,5$ . При  $\lambda/a < 2$  в волноводе распространяется единственный вид волн типа  $H_{10}$ , которые рекомендованы к использованию. По длине волны можно подобрать размеры сторон  $a$  и  $b$  [13, 14]. Расстояние от штыря до оси деформируемого образца было кратным длине волны  $\lambda$ . В этом случае значение напряженности электрического поля на образце максимально (рисунок 3б). За образцом на расстояние  $\lambda/4$  волновод ограничивался глухой стенкой. Длина волновода от одной глухой стенки до другой составила  $\lambda + \lambda/2$ . Короб волновода был изготовлен из нержавеющей стали с окнами во взаимно перпендикулярных плоскостях для размещения испытуемого образца (рисунок 4). В опытах применялось дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности  $E$  электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на  $90^\circ$ . Температуру образцов измеряли термопарой во время действия СВЧ – излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышала  $60^\circ - 80^\circ$  С.

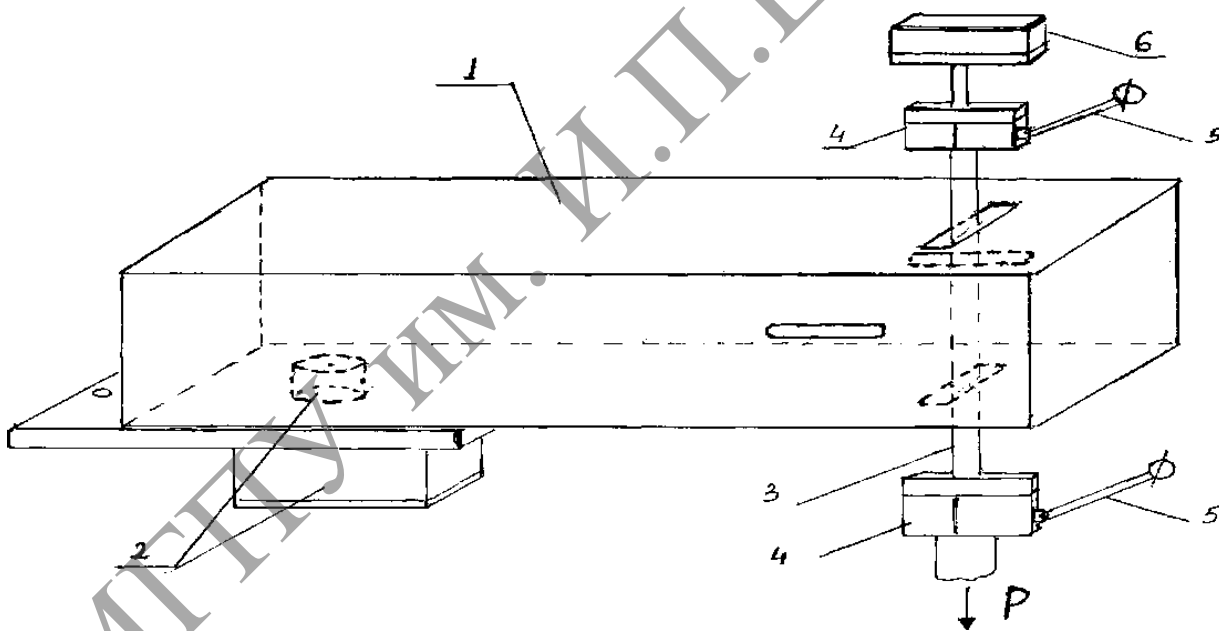


Рисунок 4. – Схема короба волновода (1) с магнетроном (2) для подведения СВЧ – излучения к деформируемому образцу (3), находящегося в захватах (4) с токоподводом (5) и датчиком измерения усилий (6)

### 6.3. Материалы и методика эксперимента

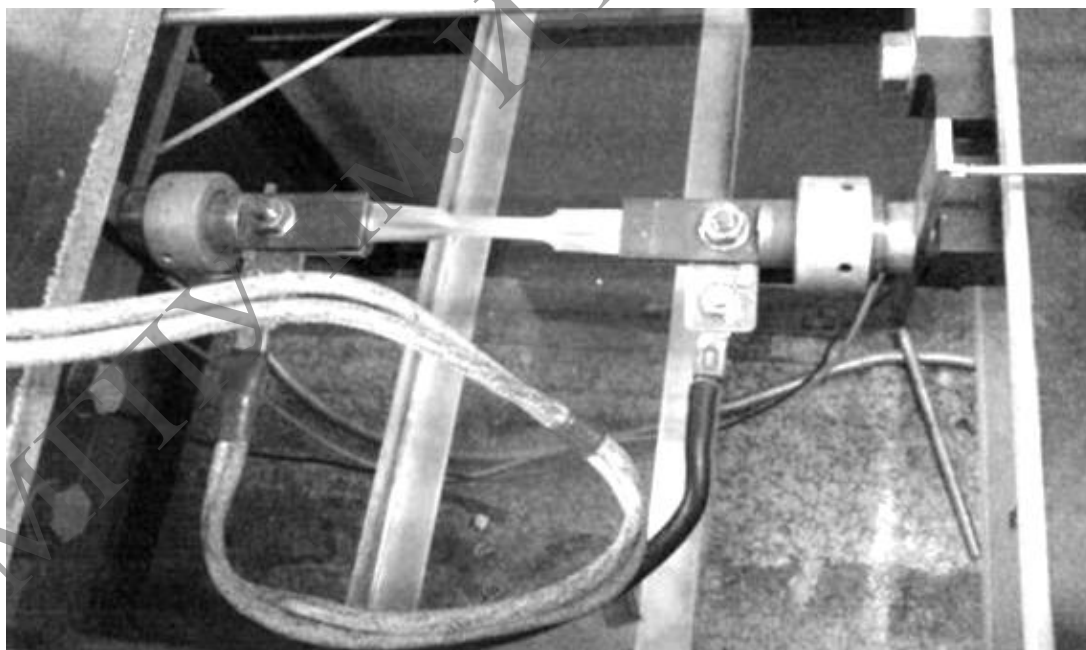
Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов была выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т как более благоприятный объект с парамагнитной примесью при исследовании ЭПЭ. Пластическую деформацию проводили растяжением с одновременным действием импульсами тока.

В опытах применялось дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности  $E$  электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на  $90^{\circ}$ . Образцы вырезались из стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм в соответствии с требованиями по конфигурации и размерам образца для испытательной машины ИР5047-50-10, с длиной рабочей части 28 мм.

Влияние СВЧ-излучения на пластическую деформацию металла изучалось в двух постановках опыта: 1) при активной деформации с разной постоянной скоростью; 2) при релаксации напряжений.

На рисунке 5а, б представлено расположение образца в горизонтальной испытательной машине ИР 5047-50-10. Образцы крепились с помощью электроизолированных зажимов. К ним подводился импульсный ток. Внутри машины устанавливается короб волновода с магнетроном СВЧ – излучения.

а)



б)

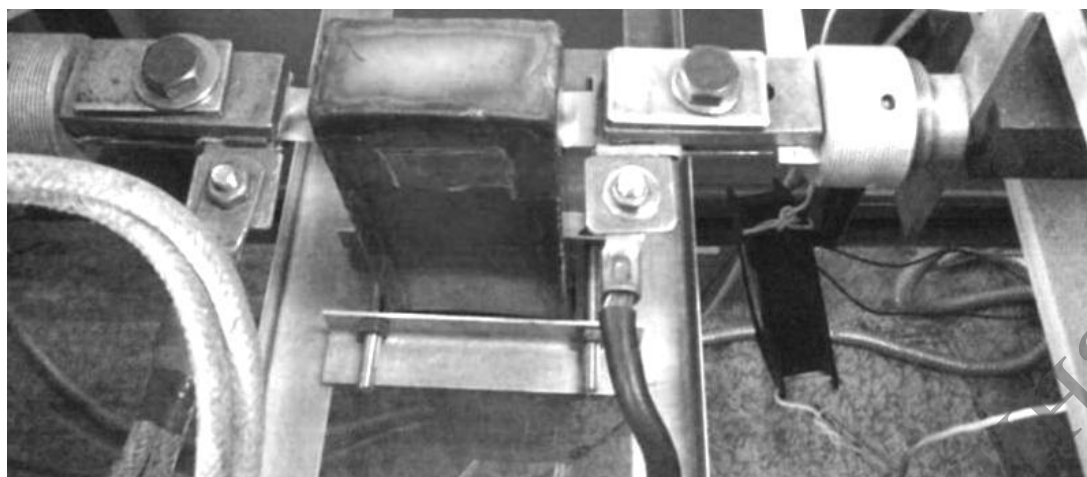


Рисунок 5. – Блок деформации образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм с длиной рабочей части 28 мм в изолированных зажимах горизонтальной испытательной машины, к которым подводится импульсный ток: а) при действии импульсами тока на последней стадии растяжения; б) при действии СВЧ-излучения и импульсов тока. Образец находится внутри волновода, магнетрон в низу. ЭМ поле E направлено поперек оси образца

#### 6.4. Результаты эксперимента

Влияние СВЧ-излучения на пластическую деформацию металла изучалось при **релаксации напряжений**. На рис. 6 даны скачки деформации разупрочнения при действии импульса тока J и J + СВЧ в условиях **активной деформации**.

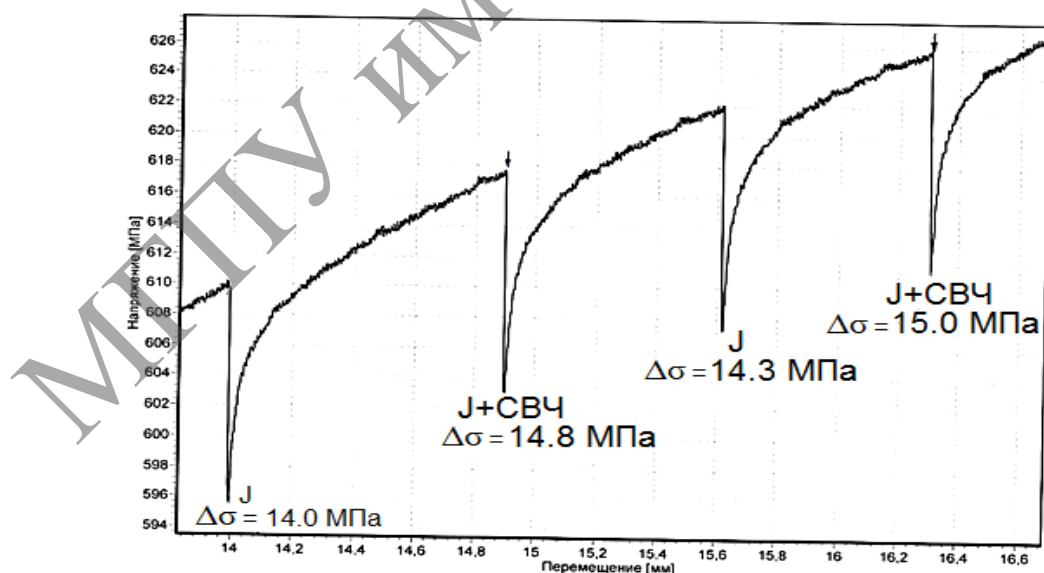


Рисунок 6. – Уровни деформирующих усилий образцов в СВЧ-поле и в поле СВЧ совместно с импульсным током

Во время **активной деформации** сначала подавались одиночные импульсы тока амплитудой порядка  $1000\text{А}/\text{мм}^2$ , длительностью 250 мкс, затем после увеличения нагрузки на 50Н подавался импульс тока такой же по величине и СВЧ-излучение. На диаграмме растяжения пики разупрочнения деформируемых образцов с током чередовались с пиками разупрочнения ток и СВЧ-излучение. Ориентация поля **E** СВЧ-излучения была поперечной. Скачки деформации разупрочнения при действии импульса тока составили величину порядка 14,0–14,3 МПа; а тока и СВЧ – излучения 14,8–15,0 МПа.

Электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию нержавеющей стали усиливалось в присутствии СВЧ-излучения. Небольшое тепловое действие тока и СВЧ не вызывало скачков деформации разупрочнения металла. Увеличение пиков разупрочнения при СВЧ-излучении указывает на дополнительное действие излучения на активную деформацию металла.

На рисунке 7 приведены данные измерений пиков разупрочнения, полученные от пяти образцов при действии импульсов тока высокой плотности порядка  $1000\text{А}/\text{мм}^2$  при длительности 250 мкс. Верхние данные (в границах пунктирных линий) для тех же образцов при одновременном действии импульсов тока и СВЧ-излучения. Ориентация электрического поля **E** СВЧ-излучения была продольной.

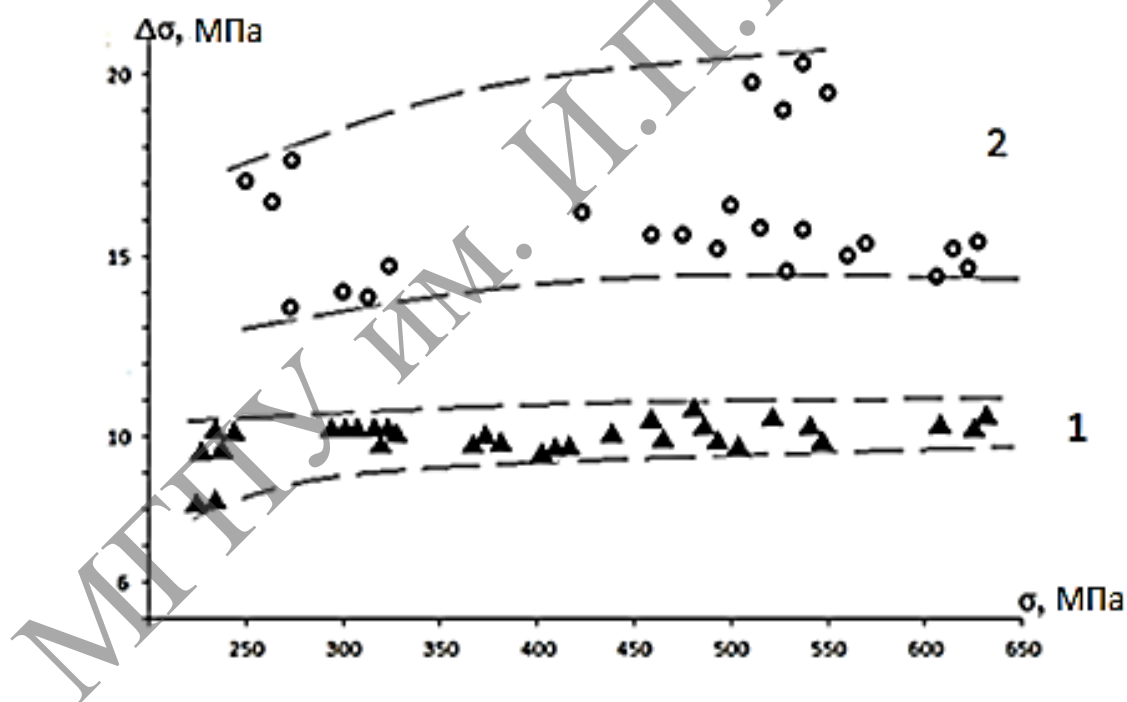


Рисунок 7. – Зависимость пиков разупрочнения  $\Delta\sigma$  МПа, возникших под действием импульсов тока **J** (1), а также тока **J** и СВЧ (2) – излучения от величины напряжения  $\sigma$  в условиях активного деформирования. Данные получены по пяти образцам

При **релаксации механических напряжений** в условиях кратковременных остановок растяжения на 3 мин без разгрузки образцов производилась регистрация релаксация напряжений для следующих случаев:

- без какого-либо воздействия;
- СВЧ-излучения;
- импульсного тока;
- совместно импульсного тока и СВЧ-излучения.

Было проведено по 3–4 серии измерений релаксации механических напряжений на каждом из испытанных образцов. В каждом измерении релаксации напряжений остановка привода машины сопровождалась резким падением нагрузки за счет разрядки внутренних напряжений и некоторого удлинения образца. Возобновление растяжения перед каждой новой серией измерений релаксации напряжений начиналось с более высокой нагрузки и так вплоть до разрушения образца. Каждая серия измерений начиналась сразу после остановки растяжения по достижению уровня нагрузки на 50–100 Н больше прежнего. Таким образом, каждая серия измерений состояла из четырех пауз релаксации напряжения в четырех указанных постановках опыта. На одном образце проводилось, как правило, по 12–16 измерений. По достижению нагрузки в 1400–1500 Н образец обычно разрушался в шейке.

В таблице 1 приведены падения нагрузки в первые 2–3 секунды после остановки активной деформации. Видно, что без какого-либо воздействия начальная релаксация не превышает 3–5 %. При действии СВЧ-излучения и импульсов тока соответственно 4–5 % и 6–7 %. При совместном действии (с учетом вычета теплового действия) эффект достигает значений 12–13 %, т. е. почти аддитивен. В этом случае применялась поперечная ориентация поля  $E$  в составе СВЧ-излучения.

Таблица 1. – Величина падения нагрузок при остановках привода машины в начале пауз релаксации напряжений в различных постановках опыта

№ пп	Виды воздействий	1-я серия измерений		2-я серия измерений		3-я серия измерений	
		$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%
1	Без какого-либо воздействия	25 от 700	3,5	56 от 1000	5,6	66 от 1250	5,3
2	СВЧ-излучение	32 от 800	4,0	66 от 1050	6,2	80 от 1300	6,1
3	Импульсы тока	60 от 900	6,6	83 от 1100	7,5	104 от 1350	7,6
4	Совместное действие тока и СВЧ-излучения	110 от 950	12,0	160 от 1200	13,3	170 от 1400	12,4

В таблице 2 приведены падения нагрузки за 3-х минутную паузу релаксации на 8 %, а при действии СВЧ-излучения и тока на 7,5–12,3 % и 10–13 % соответственно. Во всех случаях рост падения нагрузок происходит с увеличением уровня приложенных напряжений по номерам серий измерений. При этом совместное действие тока и СВЧ-излучения дает релаксацию в пределах 14,6–22,5 % за полную паузу релаксации.

Таблица 2. – Величина падения нагрузок при остановках привода машины за полную паузу релаксации напряжений в течение 3 мин в различных постановах опыта

№ пп	Виды воздействий	1-я серия измерений		2-я серия измерений		3-я серия измерений	
		$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%
1	Без какого-либо воздействия	45 от 700	6,4	77 от 1000	7,7	100 от 1250	8,0
2	СВЧ-излучение, поперечное поле E	60 от 800	7,5	120 от 1050	11,4	160 от 1300	12,3
3	Импульсы тока	85 от 850	10,0	120 от 1000	12,0	180 от 1350	13,3
4	Совместное действие тока и СВЧ-излучения	140 от 950	14,6	210 от 1200	17,5	315 от 1400	22,5

Видно, что электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию [1–2, 6] нержавеющей стали усиливается в присутствии СВЧ-излучения. Совместное действие тока и СВЧ-излучение создавали нагрев образцов не более чем на  $80^{\circ}\text{C}$ . Снижение нагрузки за счет нагрева образца вычиталась из эффекта воздействия.

В таблице 3 приведены результаты падения нагрузок на образце, на который в процессе релаксации напряжений действовало поле вектора **E** продольно относительно оси испытуемого образца. Эффект совместного действия достигал 30 %.

Таблица 3. – Величина падения нагрузок на образце при остановках привода испытательной машины за полную паузу релаксации напряжений в течение 3 мин в различных постановах опыта

№ пп	Виды воздействий	1-я серия измерений		2-я серия измерений		3-я серия измерений		4-я серия измерений	
		$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%	$\Delta F$ от $F_0$ , Н	%
1	Без какого-либо воздействия	45 от 700	6,4	70 от 900	7,7	85 от 1000	8,1	110 от 1250	8,8
2	СВЧ-излучение поле E продольно	90 от 850	10,5	110 от 850	11,6	130 от 1150	11,3	160 от 1300	12,3
3	Импульсы тока	95 от 900	10,6	120 от 1000	10,9	170 от 1200	14,1	210 от 1350	17,5
4	Совместное действие тока и СВЧ-излучения	170 от 950	18,0	250 от 1050	23,8	360 от 1250	29,8	420 от 1400	30,0

Была изучена также скоростная зависимость обнаруженного эффекта. Эффект действия СВЧ-излучения усиливается с ростом скорости

деформации, что можно связать с возрастанием числа незавершенных сдвигов и числа подвижных дислокаций, на которые могли оказывать влияние импульсный ток и СВЧ-излучение, способствуя разрядке и последующей релаксации напряжений.

В проведенных опытах было подтверждено также ранее наблюдавшееся явление исчезновения магнитных свойств у нержавеющей стали после электропластической деформации [2] за счет подавления аустенитно-мартенситного превращения. В результате обычной деформации без какого-либо воздействия шейки образцов становится магнитной из-за выпадения в результате механических перенапряжений альфа-фазы или мартенсита деформации, обладающего магнитными свойствами. Это явление было впервые зафиксировано также при действии СВЧ-излучения на деформируемый металл.

### 6.5. Результаты рентгеноструктурных исследований

Для рентгеноструктурных исследований были выбраны образцы, представленные в таблице 4.

Таблица 4. – Условия механических испытаний и режимы обработки образцов

Образец	Режим обработки	Скорость деформации $v$ , мм/мин	Примечания
Структура и рентгенофазовый анализ			
исх.	без обработки	–	12X18H10T (в состоянии поставки)
3	без тока	0,5	–
13	без тока	0,3	
2	с током	0,1–0,2	слабо магнитная
12	с током	0,3	слабо магнитная
15	с током + СВЧ	6,15	слабо магнитная
19	с током + СВЧ	6,2	слабо магнитная
18	с током + СВЧ	0,2	слабо магнитная
20	с током + СВЧ + релаксация		Режим нагружения при релаксации: (1) нагружение без тока + (2) с током (подгружение) + (3) с током + СВЧ (подгружение)

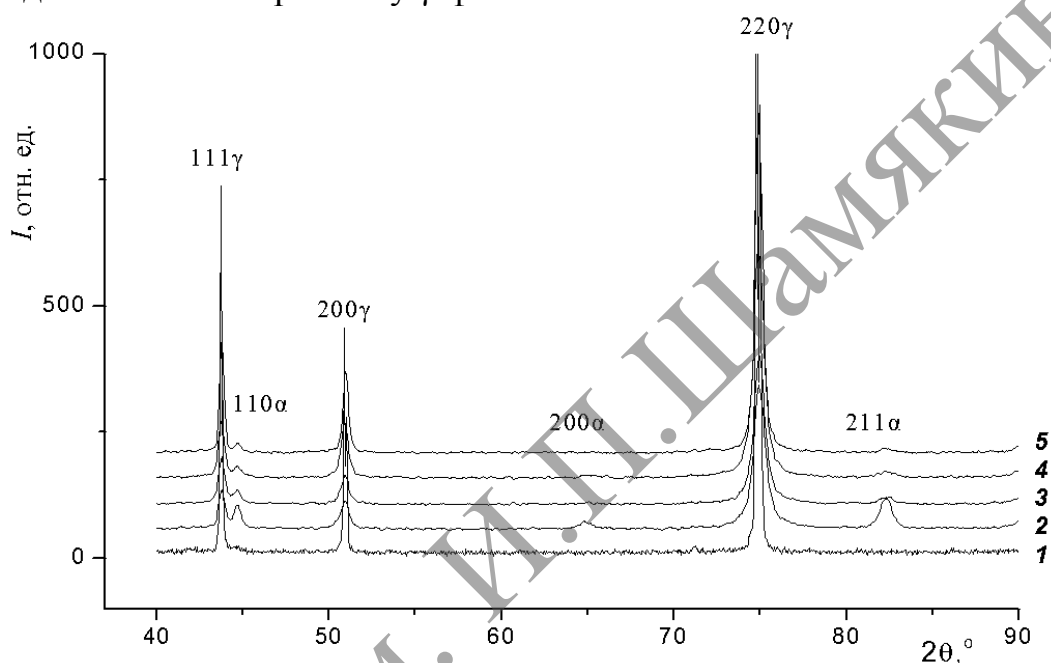
Исследования проводили на медном  $K\alpha$ -излучении, используя рентгеновский дифрактометр, оснащенный вертикальным гониометром и энергодисперсионным детектором Пельтье. При обработке экспериментальных дифрактограмм и при проведении фазового анализа образцов использовали программное обеспечение дифрактометра и программу Match! 1.10.

Дифрактограммы ряда образцов, подвергавшихся соответствующей обработке, приведены на рисунке 8. Кривая 1 демонстрирует исходное



состояние образца – аустенит ( $\gamma$ -фаза) с ГЦК кристаллической решеткой, в которой присутствует интенсивная кристаллографическая текстура. Параметр решетки аустенита значительно меньше табличного значения для  $\gamma$ -Fe, что объясняется вхождением в его решетку значительного числа атомов никеля, присутствующих в исходном составе исследуемой стали.

Оказалось, что для ГЦК структуры  $\gamma$ -фазы положение линий на дифрактограммах соответствующих образцов наиболее точно описывается приведенными в базе данных ICDDPDF-2 дифракционными спектрами следующих железо-никелевых сплавов:  $\text{Fe}_3\text{Ni}$  (01-071-8325),  $\text{Fe}_{0,612}\text{Ni}_{0,388}$  (01-074-5839) и  $\text{Fe}_{0,64}\text{Ni}_{0,36}$  (00-047-1405). Таким образом, можно говорить о вхождении никеля в решетку  $\gamma$ -фазы.



**Рисунок 8. – Рентгеновские дифракционные спектры  $I(2\theta)$  образцов: 1 – исходное состояние (обр. № 1); 2 – деформация без тока (обр. № 3); 3 – деформация с током (обр. № 2); 4 – деформация с током и СВЧ (сочетанное воздействие) (обр. № 15); 5 – после сочетанного воздействия и релаксации (обр. № 20)**

В отличие от  $\gamma$ -фазы, дифракционная картина от  $\alpha$ -фазы, возникающей в образцах при ЭМ обработке, практически неотличима от  $\alpha$ -Fe, что указывает на низкое содержание в ней легирующих добавок даже после соответствующих ЭМ обработок. Кривая 2 на рисунке 8 соответствует образцу, деформированному без тока, в котором сформировалась мартенситная  $\alpha$ -фаза, кривая 3 – образцу, деформированному с током, под действием которого формирование мартенсита подавляется. Общее количество мартенсита при этом составляет ~23–26 и ~14–17 об. %, соответственно. Деформация с током и СВЧ (кривая 4) ведет, как показывают результаты, приведенные в таблице 2, к дальнейшему снижению содержания мартенсита до ~9–13 об. %, а дополнительная релаксационная обработка (кривая 5) – до уровня менее 5 об. % мартенсита.

Данные исследования тонкой атомной структуры [15], подвергшихся ЭМ обработке образцов, приведены на рис. 9. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР), характерный размер субзерен составляет  $\sim 500$  нм, что в сочетании с малой величиной микроискажений,  $< 0,1\%$ , на дифрактограммах образцов, исследованных в исходном состоянии, проявляется к обостренной форме дифракционных пиков, при которой  $K\alpha_1$  и  $K\alpha_2$ -дублет разрешался уже на относительно малых углах у линии  $111_\gamma$ . Во всех остальных случаях размеры ОКР были, как правило, существенно ниже и, кроме того, присутствовали значительные микродеформации.

Размер ОКР  $\gamma$ -фазы в образцах, подвергшихся пластической деформации, не зависел от того, применялась или нет при этом ЭМ обработка, и составлял  $D_\gamma \sim 100\text{--}200$  нм. Наблюдаемые в  $\gamma$ -фазе микродеформации  $\epsilon_\gamma$  также были слабо подвержены изменениям и составляли  $\sim 0,4\%$ . Для мартенсита  $\alpha$ -Fe размер ОКР был менее 70 нм (типичные значения – в интервале 30–70 нм) за исключением образца № 20, подвергнутого сочетанному воздействию с последующей релаксацией, в котором размер  $D_\alpha$  неожиданно вырос до 500 нм.

Действие пластической деформации также, как и деформации с током, приводило к значительным микроискажениям, достигавшим 0,3%. В результате СВЧ воздействия величина  $\epsilon_\alpha$  повышалась еще больше и достигала 0,5%. (рисунки 9б), причем как в случае обработки, сочетавшей токовую и СВЧ, так и при обработке с последующей релаксацией.

Наряду с анализом параметров тонкой атомной структуры было также проанализировано влияние различных режимов ЭМ обработки на кристаллографическую текстуру  $\alpha$ -  $\gamma$ -фазы в образцах. Для этого использовали метод Харриса [16], применяемый для оценок преимущественных ориентировок с направлением осей, нормальных отражающим плоскостям ( $hkl$ ). Значение текстурной функции Харриса  $T(hkl) > 1$  подтверждает сам факт наличия текстуры, а ее величина – степень ее «обостренности»:

$$T(hkl) = \frac{I(hkl)/I_{\text{пк}}(hkl)}{(1/n) \cdot \sum_n [I(hkl)/I_{\text{пк}}(hkl)]}$$

где  $I_i(hkl)$  – интегральные интенсивности рассеяния исследуемым образцом с текстурой и поликристаллическим (ПК) эталонным образцом с  $T(hkl) = 1$  соответственно;  $n$  – число линий на дифрактограмме. В качестве эталона обычно используются данные базы данных ICDD для соответствующих фаз, в данном случае, PDF-2. По этим данным, теоретически в  $\gamma$ -фазе должна наблюдаться преимущественная ориентировка типа (111), а в  $\alpha$ -фазе – (110).

Анализ показал, что уже в исходном стальном образце отражающие плоскости  $\gamma$ -фазы были ориентированы по нормали к направлению (220) – функция Харриса в исходном состоянии составляла  $T_\gamma(220) \approx 3,0$ , причем при последующей обработке степень «остроты» текстуры сохранялась на том же

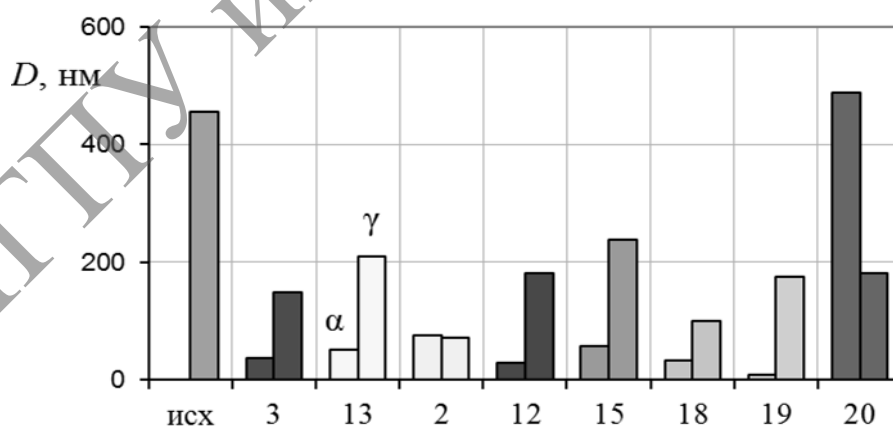
уровне и менялась очень незначительно.

В случае  $\alpha$ -фазы, стимулированной в шейке образца его пластической деформацией, имела место преимущественная ориентировка с  $T_{\alpha}(211) \sim 1,5-2,0$ . Изменения  $T_{\alpha}(211)$  носили несистематический характер, поэтому сделать какие-либо выводы о влиянии условий ЭМ обработки на текстуру  $\alpha$ -фазы не представляется возможным. Можно лишь предположить вероятное наличие ориентационного соответствия между структурами аустенита и мартенситной фазы, образующейся в процессе пластической деформации, которое сохраняется, несмотря даже на подавление мартенситообразования при ЭМ обработке.

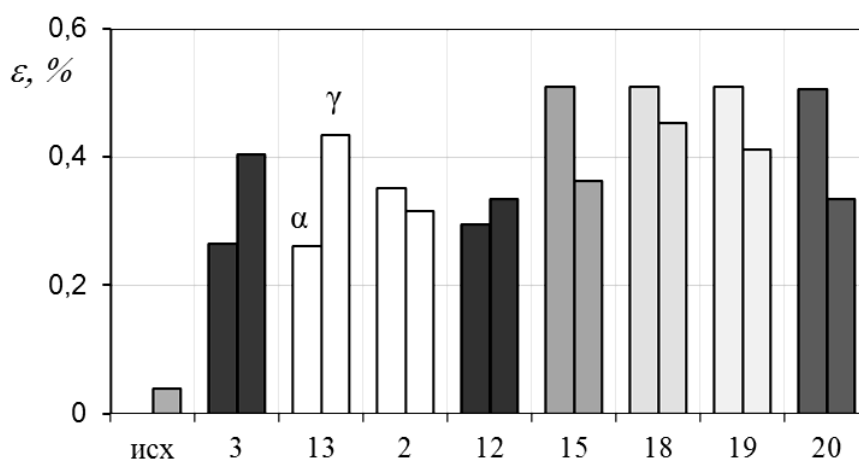
Таблица 5. – Данные периода решетки и содержания фазы

Образец	Период решетки, нм		Содержание фазы, об. %		Структура $\gamma$ -фазы	$R_p$
	$\gamma$ -фаза	$\alpha$ -фаза	$\gamma$ -фаза	$\alpha$ -фаза		
исх.	0,35887	–	100	–	$Fe_{0,64}Ni_{0,36}$	0,85
3	0,358347	0,287076	76,6	23,4	$Fe_3Ni$	0,68
13	0,35836	0,287222	73,5	26,5	$Fe_3Ni$	0,73
2	0,358373	0,286535	86,4	13,6	$Fe_3Ni$	0,61
12	0,358362	0,286574	83,4	16,6	$Fe_3Ni$	0,73
15	0,35849	0,286558	91,0	9,0	$Fe_3Ni$	0,67
18	0,358447	0,286634	86,6	13,4	$Fe_3Ni$	0,72
19	0,358352	0,28642	90,6	9,4	$Fe_3Ni$	0,72
20	0,358394	0,283227	96,1	3,9	$Fe_3Ni$	0,71
ICDD PDF-2	$\gamma$ -Fe	$\alpha$ -Fe				
	0,366	0,2866				

Примечание.  $R_p$  – фактор достоверности



(a)



(б)

(а) – размер ОКР;

(б) – величина микроискажений для  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазы в исходном состоянии и после обработки (номера образцов соответствуют приведенным в таблице 4 и 5)

Рисунок 9. – Параметры тонкой атомной структуры образцов стали 12X18H10T, полученные в результате обработки дифрактограмм

## 6.6. Исследование микроструктуры

Исследование микроструктуры проведено с использованием растрового электронного микроскопа LEO 1455VP (CarlZeiss). Наблюдение осуществлялось регистрацией отраженных электронов, ускоряющее напряжение составляло 20 кВ. Морфологический анализ изображения определялся прибором «Пост микроконтроль МК-3» с помощью компьютерной программы AutoscanObjects.

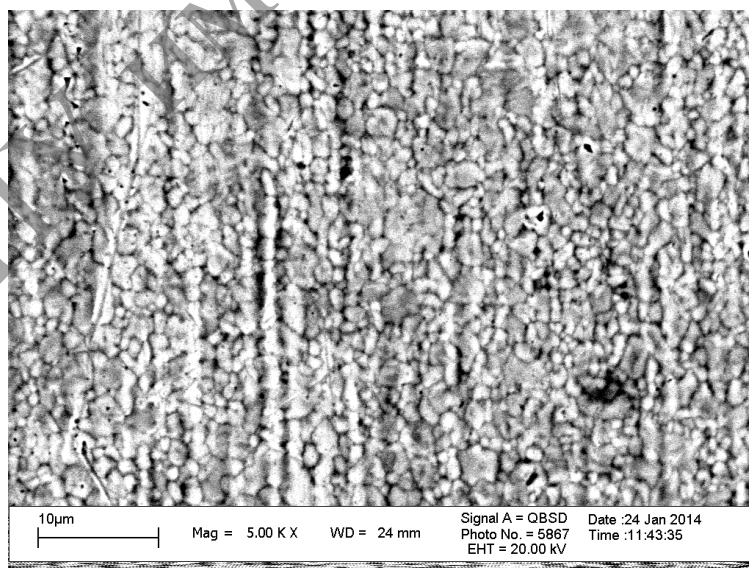


Рисунок 10. – Микроструктура образца (шейка с током, скорость  $V = 0,5$  м/с.)

На поверхности образцов не наблюдается преимущественной ориентации зерен. В основном, зерна имеют равноосную форму. Расположение зерен имеет преимущественное группирование вдоль линий, совпадающих с направлением деформирования. На границах зерен и полосах деформирования наблюдаются увеличение концентрации титана. В связи с его вязкостью, деформация, по-видимому, осуществляется в основном путем скольжением зерен по титановой «смазке». Выход титана на поверхность зерен может быть обусловлен дислокационным «выметанием» при деформации.

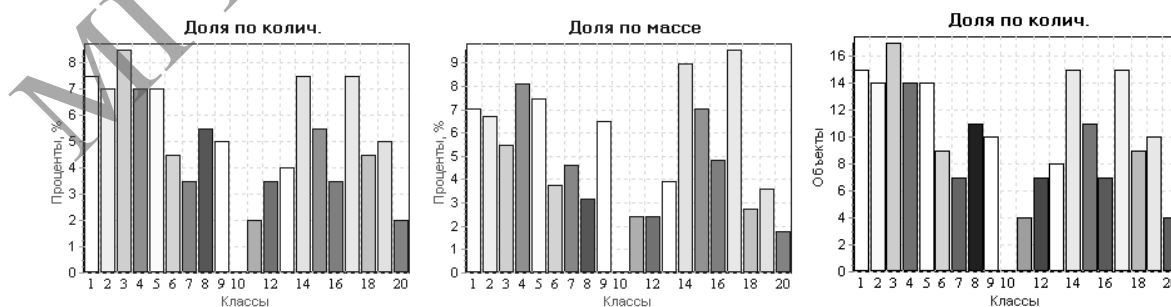
Сравнительный анализ микроструктуры образцов с током и без тока по различным параметрам показал существенное влияние внешних энергетических воздействий на деформацию зерен стали.

Под действием электрического тока и СВЧ-излучения происходит уменьшение площади и периметра зёрен. Дробление зёрен приводит к тому, что микроструктура материала деформированного образца становится мелкозернистой (рисунок 10). Зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественно аксиальной текстурой.

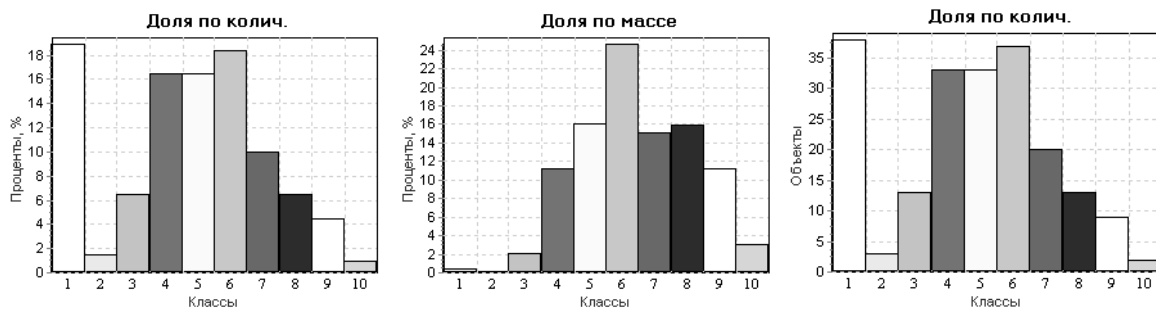
Электропластическая деформация является сложным, многостадийным процессом [2]. Данные по микроструктуре нержавеющей стали, полученные после энергетических воздействий и достижения значительных деформаций образцов, свидетельствуют о проявлении обратной зависимости Холла-Петча. Закон Холла-Петча дает количественное описание роста предела текучести поликристаллического материала с уменьшением размера зерна. В основе этой зависимости лежат дислокационные механизмы пластической деформации: границы зерен тормозят движение дислокаций. По-видимому, с увеличением степени деформации, под действием импульсного тока и СВЧ-излучения изменяется доминирующий механизм деформации. Механизмы обратного закона Холла-Петча в настоящее время недостаточно изучены [17].

## 6.7. Гистограммы

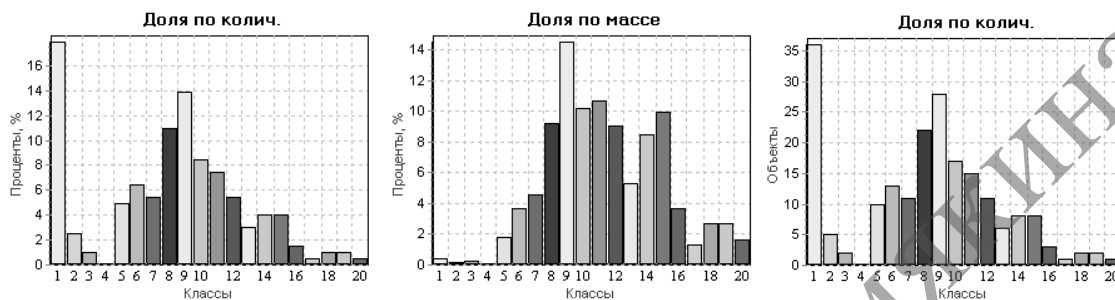
Гистограмма распределения объектов по ориентации:



Гистограмма распределения объектов по длине:



Гистограмма распределения объектов по ширине:



Морфологический анализ микроструктуры образцов по различным параметрам показал существенную зависимость от внешних энергетических воздействий.

Под воздействием электрического тока и СВЧ-излучения происходит уменьшение площади и периметра зерен, т. е. происходит дробление зерен, и микроструктура деформационной части образца становится мелкозернистой, зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественной ориентацией аксиальной структуры, существенно уменьшается длина, ширина и удлинение зерен, вертикальная и горизонтальная проекция зерен. Важной характеристикой для мелкозернистой структуры образца является эквивалентный диаметр и средний габарит зерен, а также диаметр Мартина, минимальный и максимальный радиус, которые уменьшаются под влиянием внешних энергетических воздействий. Подтверждающим фактором влияния внешних энергетических воздействий на микроструктуру образцов является значение деформации зерен.

## 6.8. Микротвердость

Микротвердость образцов измерялась на цифровом микротвердомере MicroMet 5114 с сенсорным LCD пультом управления с автоматическим расчетом значений твердости и накоплением статистики, при помощи алмазной пирамидки (Виккерс). Время приложения нагрузки 15 с, нагрузка на индентор 1000 г, угол алмазной пирамидки  $\theta = 136^\circ$ .

$$HV = k \cdot \frac{F}{S} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Таблица 6

№ образца	7	6	5	8	9
	без тока $v=1,1$ мм/мин	с током $v=1,1$ мм/мин	с током $V=0,5$ м/с	без тока $v=2,5$ мм/мин	с током $v=2,5$ мм/мин
HV шейки	636,6	513,7	491,0	585,7	571,7
HV захвата	313,1	313,9	313,4	316,1	315,0

Под действием внешних энергетических воздействий импульсов тока и СВЧ-излучений во время деформации растяжением микротвердость деформационной части образцов (шейки) уменьшается. Микротвердость захватов практически остается неизменной (таблица 6).

### Выводы

- Впервые экспериментально обнаружено влияние СВЧ-излучения на процесс пластической деформации металла в двух постановках опыта, как при активной деформации образцов растяжением, так и в опытах по релаксации механических напряжений в нагруженных образцах при ориентациях вектора напряженности электрического поля Е СВЧ-излучения продольно оси деформируемых образцов и поперечно деформационной оси.

- При продольной ориентации вектора Е СВЧ-излучения и суммарном действии тока эффект разупрочнения металла возрастал примерно на 8 % (с 22 % до 30 %).

- Тепловые эффекты действия тока и СВЧ-излучения корректно вычитывались из величин общего снижения деформирующих усилий и релаксации напряжений.

- Величина пинч-эффекта действия тока на плоских тонких (0,2 мм) образцах в проведенных опытах в этой части проекта была слабо выражена.

- Установлено, что эффект действия СВЧ-излучения усиливается с ростом скорости деформации.

- Было подтверждено ранее наблюдавшееся явление исчезновения магнитных свойств у нержавеющей стали в результате электропластической деформации за счет подавления аустенитно-мартенситного превращения.

- В результате обычной деформации шейка образцов становится магнитной из-за выпадения перенапряженной альфа-фазы или мартенсита деформации (оцк-решетка), обладающего магнитными свойствами.

- В образцах, деформированных с током, шейки оставались, как и захваты, находящиеся в зажимах машины в обоих случаях немагнитными в силу преобладания в них гамма-фазы или аустенита (гцк-решетка).

- Наибольший эффект действия СВЧ-излучения на пластическую деформацию нержавеющей стали 12ХН10Т составил до 10–12 % разупрочнения.

- Совместное действие импульсного тока и СВЧ-излучения повышает эффект разупрочнения металла до 30 %, что свидетельствует о наличие нового механизма разупрочнения, возможно, связанного со спиновым разупрочнением металла.

### Использованная литература:

1. Троицкий, О.А. Электромеханический эффект в металлах / О.А. Троицкий // Письма в ЖЭТ. – 1969. – Т. 10. – С. 18–22.
2. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы: монография / Ю.В. Баранов [и др.] – М.: Изд-во МГИУ, 2004. – 843 с.
3. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка под действием импульсного тока / Л.Б. Зуев [и др.] // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 239, № 1. – С. 84–87.
4. Кравченко, В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации / В.Я. Кравченко // ЖЭТФ. – 1966. – Т. 51, № 5. – С. 1676–1681.
5. Фикс, В.Б. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации / В.Б. Фикс // ЖЭТФ. – 1966. – Т. 51, № 5. – С. 1676–1681.
6. Рощупкин, А.М. Об эффекте электрон-фононного увлечения дефектов в кристаллах / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов // Изв. РАН. Серия Физическая. – 2004. – Т. 68, № 7. – С. 998–1007.
7. Троицкий, О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом / О.А. Троицкий // Изв. АН СССР. Серия Физическая. – 1977. – № 6. – С. 118–122.
8. Спицын, В.И. Моделирование теплового и пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла / В.И. Спицын, О.А. Троицкий // Док. АН СССР. – 1975. – № 5. – С. 1070–1073.
9. Батаронов, И.Л. Электропластическая деформация металлов и динамический пинч-эффект. / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 8. – С. 57–61.
10. Molotskii, M. Magnetic effects in electroplasticity of metals / M. Molotskii, V. Fleurov // Physical Review B. – 1991. – Vol. 52, № 22. – P. 311–317.
11. Молоцкий, М. Возможный механизм магнитопластического эффекта / М. Молоцкий // ФТТ. – 1991. – Т. 33, № 10. – С. 3112–3114.
12. Головин, Ю.И. / Магниторезонансное разупрочнение кристаллов / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // ЖЭТФ. – 1999 – Т. 115, № 2. – С. 605–621.
13. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение: пер. с англ. / Г. Уотсон. – М.: Мир, 1972. – 660 с.
14. Сапунов, Г.С. Ремонт микроволновых печей / Г.С. Сапунов. – М.: Изд-во Салон-пресс, 2003. – 272 с.
15. Иверонова, В.И. Теория рассеяния рентгеновских лучей / В.И. Иверонова, Г.П. Ревкевич. – М.: Изд. МГУ, 1978. – 278 с.
16. Баррет, Ч.С. Структура металлов: Ч. 1–2. / Ч.С. Баррет, Т.Б. Масальский. – М.: Металлургия, 1984. – 686 с.
17. Carlton, C.E. What is behind the inverse Hall-Petch effect in nanocrystalline materials? / C.E. Carlton, P.J. Ferreira // ActaMaterialia. – 2007. – Vol. 55. – P. 3749–3756.



## **ГЛАВА VII. ПРИМЕНЕНИЕ ЭРГОДИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПИНЧ-ЭФФЕКТА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ**

### **7.1. Основные положения эргодической теории случайных процессов**

Воздействие импульсного тока на металлические образцы вызывает механический отклик в виде радиального и осевого движения поверхности образца, которое может фиксироваться датчиками вибрации. Такие испытания позволяют исследовать процессы, связанные с действием пинч-эффекта и скин-эффекта, в случае импульсного характера тока [1]. Одним из возможных применений предлагаемой методики может быть проведение испытаний элементов обмоток мощных трансформаторов, генераторов и моторов. Условия испытаний приближены к реальным, что позволяет учесть воздействие на образцы многоциклового нагружения при повышенных температурах и в присутствии электрических токов большой плотности. Возбуждение механических колебаний непосредственно в самом проводнике без внешних механических движущихся элементов (стендов задания многоциклового нагружения) позволяет существенно упростить испытания и снизить их стоимость. Возможность проведения испытаний на высокой частоте позволяет выполнить исследования на гигациковую усталость [2] за сравнительно малый интервал времени. При такой постановке задачи важное значение имеет статистическое обоснование возможности применения длительных испытаний с распространением их результатов на большое количество параллельно работающих в реальном оборудовании однотипных образцов (стержней обмоток упомянутого оборудования).

Исследование влияния импульсных токов на функционирование металлических проводников требует постановки сложных и длительных дорогостоящих экспериментов. В силу того, что любое измерение осуществляется при воздействии некоторых помех, исследователь имеет дело не с детерминированным, а случайным (стохастическим) процессом. Отсюда очевидна необходимость применения аппарата математической статистики как при планировании эксперимента, так и при обработке результатов измерений. Это влечет за собой увеличение количества испытываемых образцов, что требует значительных временных и материальных затрат.

Поэтому проблема извлечения наибольшей информации об изучаемых процессах при ограниченных затратах стала весьма актуальной. В связи с этим оказалось совершенно необходимым применение методов уменьшения объема инженерных экспериментов. Предлагается сократить объем испытаний и количество испытательных образцов без потери получаемой информации путем изменения плана эксперимента на основании представления об испытании материалов, как об эргодическом стационарном процессе, для которого допустима замена традиционного осреднения информации по множеству реализаций осреднением информации по времени [3].

Впервые эргодическая теория была использована для статистического изучения сложных динамических систем. Основные результаты, полученные Колмогоровым, Хинчиным, Биркгофом, Синаем, основаны на глубоком исследовании класса сильно стохастических динамических систем. В последние годы появилось новое направление, основанное на теории информации Шеннона. На математическом языке задача заключается в исследовании траекторий векторного поля в фазовом пространстве. Данная проблема включает в себя различные области научного знания от теории вероятности и топологии до теории чисел и дифференциальной геометрии [4–6]. Поскольку эргодическая теория, как и теория вероятностей, основана на понятии меры, то первоначальные ее понятия вводились в терминах общей теории меры. В терминах теории вероятностей это пространство с вероятностной мерой.

Использование эргодической теории осуществляется в ряде работ метрологического характера, связанных с измерениями, например, в измерениях электромагнитных излучений, в геодезии [7] и в ряде других областей. В этих работах происходит сравнение параметров случайных процессов, полученных двумя способами:

- 1) статистическая оценка по совокупности реализаций;
- 2) оценка по времени по одной реализации.

При адекватности этих двух оценок делается вывод об эргодичности исследуемого процесса. В своих исследованиях мы используем возможности эргодической теории случайных процессов, стационарных в широком смысле. Использование теоремы Биркгофа-Хинчина существенно упрощает анализ процессов на эргодичность и повышает быстродействие принятия соответствующего решения. Применение эргодической теории к обработке результатов эксперимента по исследованию электропластической деформации и вибрации металлов под влиянием пинч-эффекта импульсного тока оказалось весьма эффективным.

Основные вибрационные параметры, такие, как ускорение  $a(t)$  (в осевом  $a_{axial}(t)$  и радиальном  $a_{radial}(t)$  направлении), в общем случае являются случайными функциями времени, ход изменения которых регистрируется в процессе испытаний в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_m$ . Пусть над случайными функциями  $a_{axial}(t)$  и  $a_{radial}(t)$  проведено  $n$  независимых опытов, что соответствует вибрационному испытанию  $n$  образцов. В результате получено  $n$  реализаций случайных функций. Методы математической статистики позволяют найти оценки для характеристик каждой из двух случайных функций: математического ожидания  $m_{axial}(t)$ ,  $m_{radial}(t)$ , дисперсии  $D_{axial}(t)$ ,  $D_{radial}(t)$ , и корреляционной функции  $K_{axial}(t, t')$ ,  $K_{radial}(t, t')$ .

Как показали исследования, с определенного момента времени для каждого из исследуемых процессов они принимают стационарный характер, то есть имеют вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого

среднего значения, причем ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не обнаруживают существенных изменений с течением времени.

Эти процессы по своей природе более предсказуемые, чем нестационарные, и описываются в рамках корреляционной теории сравнительно простыми характеристиками, для которых выполняются следующие три условия.

Во-первых, изменение стационарной случайной функции протекает однородно по времени и для стационарной случайной функции математическое ожидание постоянно:

$$m_{axial}(t)=m_{axial}=\text{const}, m_{radial}(t)=m_{radial}=\text{const}. \quad (1)$$

Во-вторых, соблюдается условие постоянства дисперсии:

$$D_{axial}(t)=D_{axial}=\text{const}, D_{radial}(t)=D_{radial}=\text{const}. \quad (2)$$

И, наконец, в-третьих, корреляционная функция стационарного случайного процесса зависит не от величины аргументов  $t_1$  и  $t_2$  на оси абсцисс, а только от промежутка  $\tau$  между первым и вторым аргументом:  $\tau=t_2-t_1$ , т. е.

$$K_{axial}(t, t+\tau)=K_{axial}(\tau) \text{ и } K_{radial}(t, t+\tau)=K_{radial}(\tau). \quad (3)$$

Следовательно, корреляционная функция стационарного случайного процесса есть функция не двух, а всего одного аргумента. Это обстоятельство в ряде случаев сильно упрощает операции над стационарными случайными функциями.

Стационарный процесс называется эргодическим, если его числовые характеристики, полученные усреднением по множеству реализаций, с вероятностью, сколь угодно близкой к единице, равны тем же числовым характеристикам, полученным усреднением по времени по одной достаточно длинной реализации случайного процесса, т. е. для эргодических процессов  $x(t)$  справедливы равенства:

$$\tilde{x}(t) = \bar{x}(t) \quad (4)$$

$$\tilde{x}^2(t) = D_x(t) + \bar{x}^2 \quad (5)$$

$$x(t) \cdot x(t+\tau) = \overline{x(t) \cdot x(t+\tau)} \quad (6)$$

где  $\sim$  символ осреднения по времени,

$\bar{\square}$  символ осреднения по множеству реализаций.

Из эквивалентности двух способов усреднения эргодического случайного процесса по множеству и по времени следует, что нет необходимости изучать большую совокупность реализаций, а достаточно одной реализации, наблюдаемой в течение достаточно большого промежутка времени.

## 7.2. Особенности применения методов эргодической теории при исследовании вибрации, вызванной импульсными токами

На практике мы не имеем возможности исследовать случайный процесс и его корреляционную функцию на бесконечном участке времени; участок значений  $t$ , с которым мы имеем дело, всегда ограничен. Если при этом корреляционная функция стационарного случайного процесса при увеличении  $t$  не убывает, а, начиная с некоторого  $t$ , остается приблизительно постоянной, это обычно есть признак того, что процесс не является эргодическим. Стремление же корреляционной функции к нулю при  $t \rightarrow \infty$  говорит в пользу эргодического процесса. Это утверждение основано на эргодической теореме Биркхофа-Хинчина [8, 9], представляющей не только значительный теоретический интерес, но и находящей применение как в статистической физике, так и в технической практике. Причина этого состоит в том, что для определения таких важных характеристик, какими являются  $M_x(t)$ ,  $D_x(t)$  и  $K(t)$ , требуется многократное осуществление испытаний. Эргодическая теорема Биркхофа-Хинчина показывает, что с вероятностью, близкой к единице, можно при этом ограничиться единственной реализацией процесса  $x(t)$ . Итак, для того, чтобы оценивать характеристики случайного процесса по одной реализации на достаточно большом участке времени  $T$  следует выяснить характер поведения ее корреляционной функции.

При достаточно большом  $T$  математическое ожидание  $m_x$  может быть приблизительно вычислено по формуле:

$$m_x \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt \quad (7)$$

Аналогично может быть приближенно найдена корреляционная функция  $K_x(t)$  при любом  $t$ :

$$\begin{aligned} K_x(\tau) &= M [x^o(t) \cdot x^o(t + \tau)] \\ x^o(t) &= x(t) - m_x \\ K_x(\tau) &\approx \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T - \tau} x^o(t) \cdot x^o(t + \tau) \cdot dt \end{aligned} \quad (8)$$

На практике обычно интегралы (7) и (8) заменяют конечными суммами и после ряда преобразований получают окончательно:

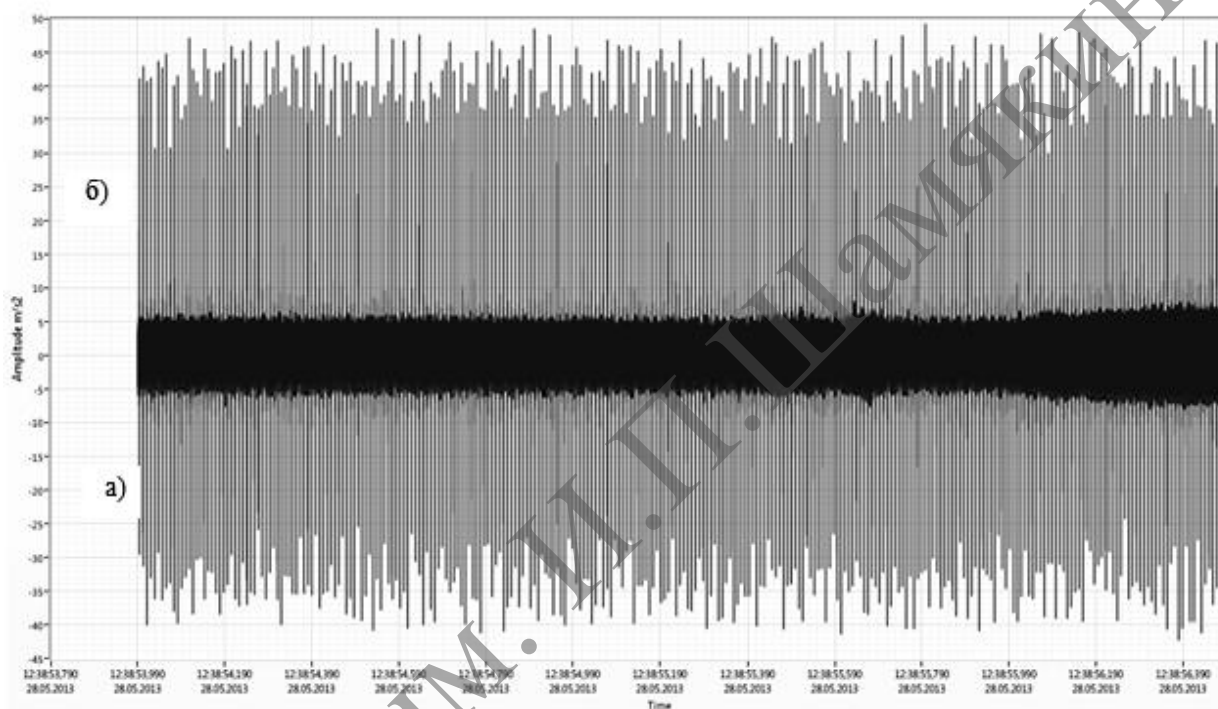
$$\tilde{K}_x \left( \frac{p \cdot T}{m} \right) = \frac{1}{m - p} \cdot \sum_{i=1}^{m-p} x^o(t_i) \cdot x^o(t_{i+p}) \quad (9)$$

где  $m$  – количество точек  $t_1, t_2, \dots, t_m$ ;  $p$  – текущие значения индекса  $t_p$ ; ( $p=1+m$ )

Вычисление корреляционной функции по формуле (9) производят для  $p=1, 2, \dots$  последовательно вплоть до таких значений  $p$ , при которых корреляционная функция становится практически равной нулю (в случае эргодического процесса) или приближаться к некоторой  $const$ , отличной от нуля.

Описанный подход был использован при исследовании радиальной и осевой вибрации полых и сплошных образцов из алюминия, латуни, меди, титана, стали, серебра и золота при пропускании через них импульсов тока. Ниже в качестве примера, приведены результаты измерений для образца в виде сплошного медного стержня диаметром 4 мм.

На рисунке 1 показана временная реализация зависимости ускорения в радиальном и осевом направлении для металлического образца при воздействии импульсного тока, а одиночный импульс вибрационного отклика из этой реализации показан на рисунке 2.

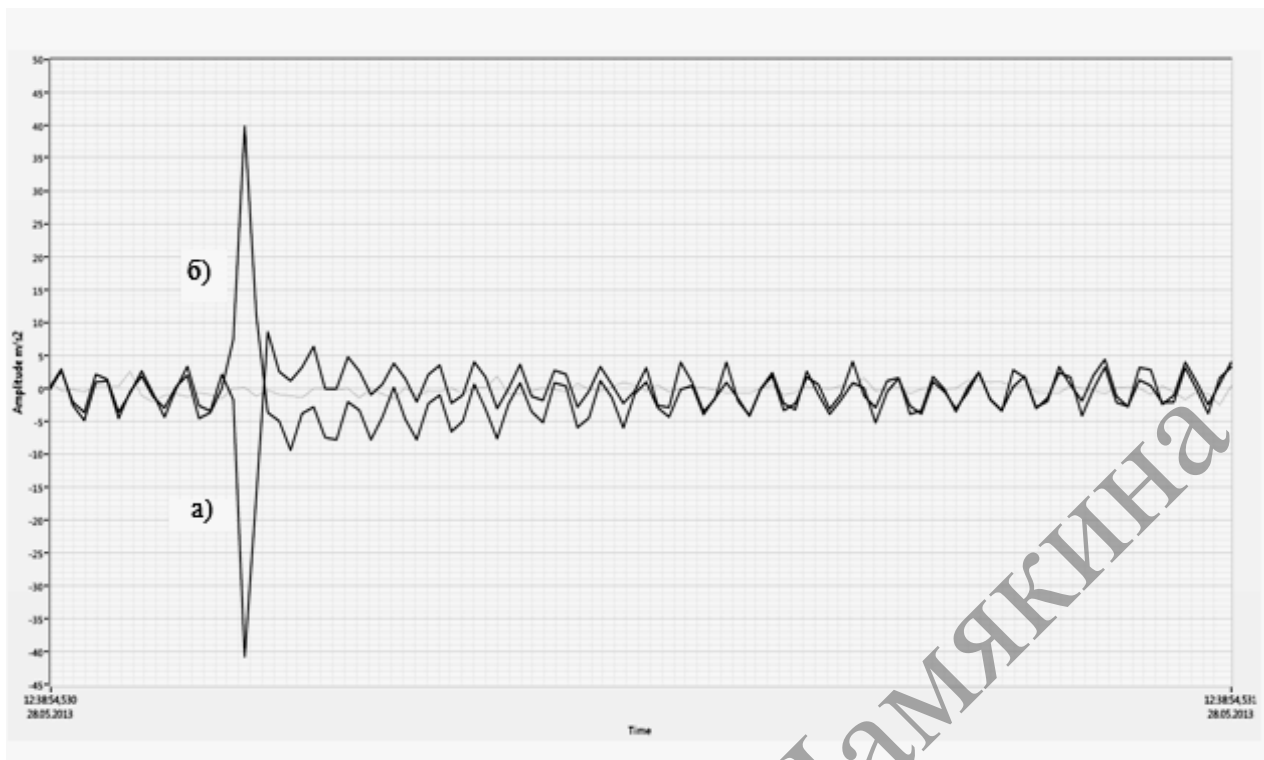


**Рисунок 1. – Сигнал ускорения ( $a_{radial}(t)$  а) – радиальное,  $a_{axial}(t)$  б) – осевое) Медный стержень диаметром 4 мм. Импульс 12 Вольт 160 мкс. Частота импульсов 100 Гц. Длительность реализации 2,6 секунды**

Увеличение частоты импульсов позволяет обеспечить проведение гигацикловых испытаний за время порядка одной недели или месяца. Связь между количеством циклов, длительностью испытаний и частотой импульсов иллюстрируется таблицей 1, где выделена область гигацикловой усталости [10].

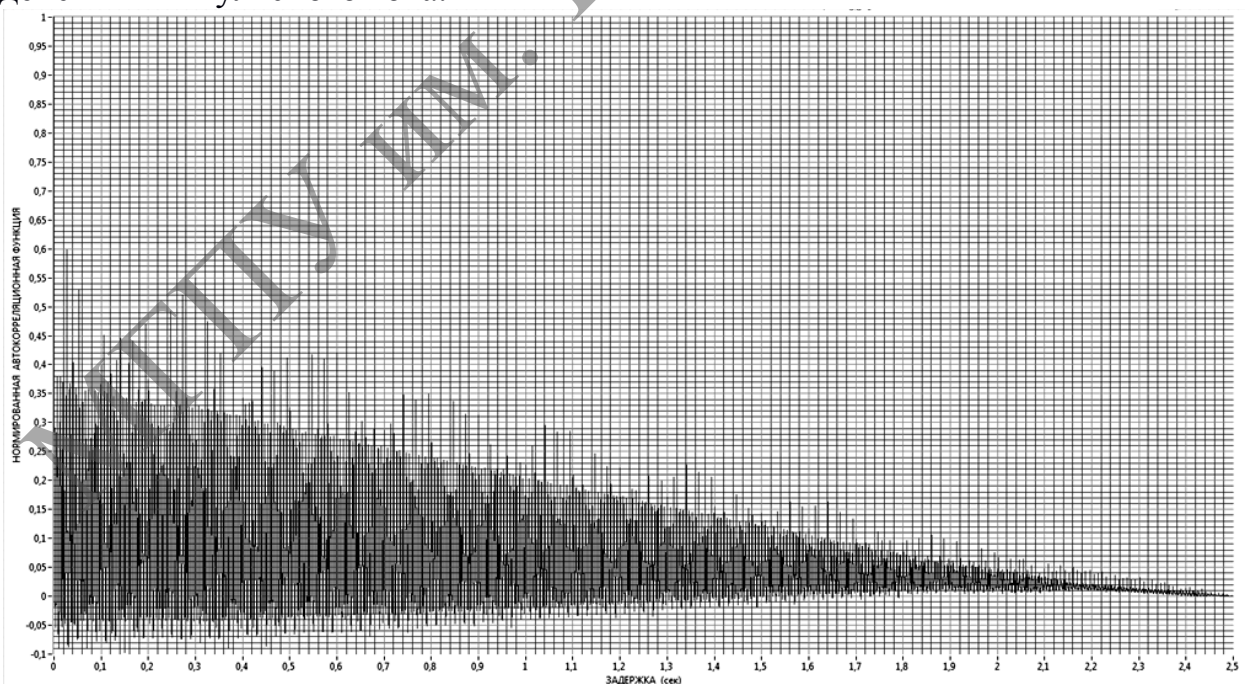
Параметры вибрационного воздействия на образец легко могут перестраиваться изменением настройки задающего генератора, управляющего формирователем импульсов тока.



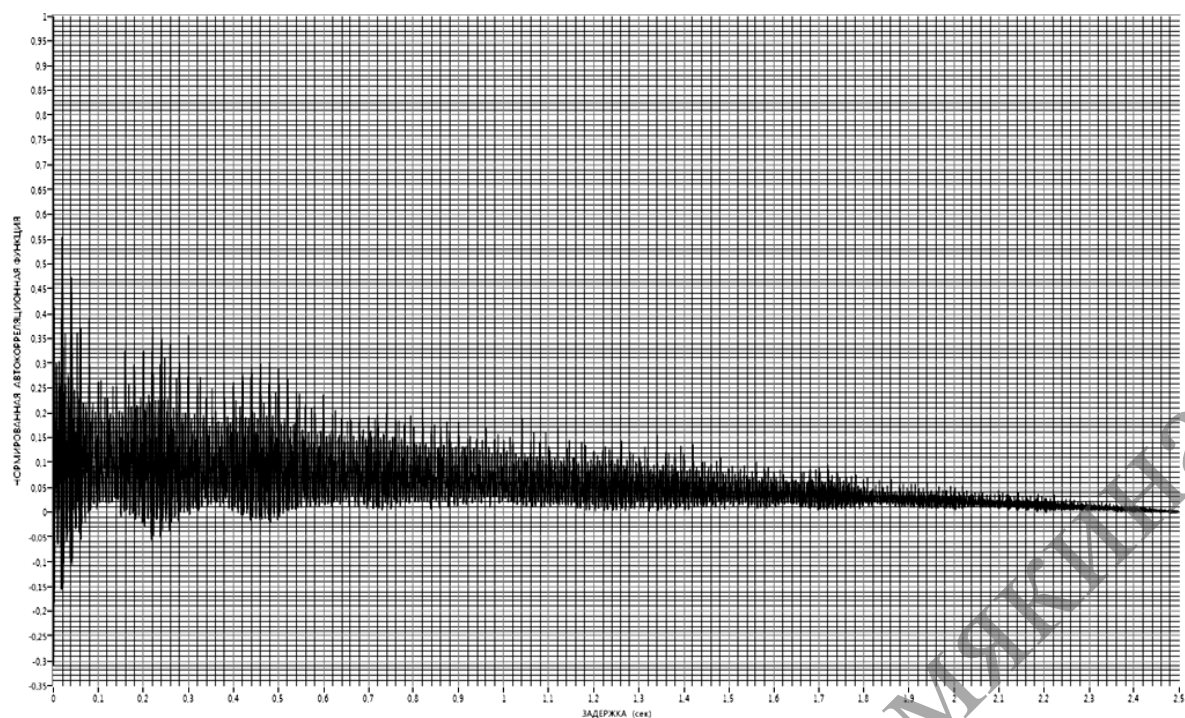


**Рисунок 2. – Сигнал ускорения ( $a_{radial}(t)$  а) – радиальное,  $a_{axial}(t)$  б) – осевое) медный стержень диаметром 4мм. Импульс 12 Вольт 160 мкс. Подробное представление одного импульса на фоне помех**

На рисунке 3–4 в качестве примера приведены зависимости автокорреляционной функции случайного процесса радиального и осевого соответственно ускорения поверхности медных образцов, испытывающих действия импульсного тока.



**Рисунок 3. – Нормированная автокорреляционная функция вибрационного отклика в виде радиального ускорения на воздействие импульсного тока с длительностью импульса 160 мкс. Частота импульсов 100 Гц. Образец – медный стержень диаметром 4 мм. Амплитуда импульсов 12 Вольт**



**Рисунок 4. – Нормированная автокорреляционная функция вибрационного отклика в виде осевого ускорения на воздействие импульсного тока с длительностью импульса 160 мкс. Частота импульсов 100 Гц. Образец – медный стержень диаметром 4 мм. Амплитуда импульсов 12 Вольт**

Таблица 1

	1 сутки	1 неделя	1 месяц	1 год	50 лет
10 Гц	$8.64 \times 10^5$	$6.048 \times 10^6$	$2.592 \times 10^7$	$3.154 \times 10^8$	$1.577 \times 10^{10}$
100 Гц	$8.64 \times 10^6$	$6.048 \times 10^7$	$2.592 \times 10^8$	$3.154 \times 10^9$	$1.577 \times 10^{11}$
1 КГц	$8.64 \times 10^7$	$6.048 \times 10^8$	$2.592 \times 10^9$	$3.154 \times 10^{10}$	$1.577 \times 10^{12}$
3 КГц	$2.592 \times 10^8$	$1.814 \times 10^9$	$7.776 \times 10^9$	$9.461 \times 10^{10}$	$4.73 \times 10^{12}$
10 КГц	$8.64 \times 10^8$	$6.048 \times 10^9$	$2.592 \times 10^{10}$	$3.154 \times 10^{11}$	$1.577 \times 10^{13}$

Анализ представленных данных и результатов их статистической обработки позволяет заключить, что автокорреляционные функции исследуемых процессов при увеличении продолжительности испытаний стремятся к нулю. Отсюда можно заключить, что исследуемые процессы могут быть с достаточной точностью рассмотрены как стационарные и эргодические. Это позволяет без потери информации исключить повторные испытания материалов, заменив их проведением одного репрезентативного испытания необходимой продолжительности. Применение данной методики позволяет реализовать ресурсные испытания материалов за ограниченный интервал времени.

### 7.3. Статистические исследования параметров вибрации мощного электрического оборудования

В современном мощном электрооборудовании в качестве нормируемого параметра принята величина ускорения [11]. Рост динамических нагрузок и повреждения элементов конструкций в значительном числе случаев связаны с электромеханическими процессами в элементах обмоток. Один их механизмов появления механических напряжений связан с силами взаимодействия проводников, по которым протекают токи. Другой механизм связан с действием тока на сам проводник [12, 13]. Возбуждение колебаний значительной амплитуды при задании импульсного тока позволяет анализировать поведение элементов конструкции обмоток. Такие испытания могут проводиться как на реальных конструкциях, так и на моделях. В данной работе была опробована методика формирования ударных импульсов при прохождении тока через модель стержня обмотки статора мощного генератора в масштабе один к десяти. Использование переносной системы формирования импульсов тока большой величины (до нескольких килоампер) позволило быстро и с малыми затратами провести такие испытания. Контроль возникающих при этом ускорений выполнялся простой системой контроля на основе трехкомпонентных акселерометров, подключаемых к системе сбора данных на основе USB модуля сбора 4431 фирмы NI и компьютера с программным пакетом LabVIEW. Аналогичным образом контроль ускорений позволяет проводить ресурсные испытания [14].

При проведении таких испытаний необходимо обоснование выбора контролируемых параметров и возможностей сокращения объема испытаний. Это связано с тем, что реальное оборудование может работать в условиях очень большого числа циклов нагрузки [2, 15]. Возможности сокращения объема испытаний при минимизации количества образцов основано на экспериментальном обосновании эргодичности динамических процессов. Кроме стационарности колебательных процессов при этом важным критерием является стремление автокорреляционных функций к нулю. Простота управления характеристиками импульсов тока позволяет в широких пределах менять режимы проведения испытаний. Это позволяет в значительной степени удовлетворить требования к методикам проведения испытаний [16].

Исследование статистических свойств последовательностей импульсных воздействий показывает, что происходящие процессы соответствуют критериям стационарности и эргодичности. Это позволяет рассматривать длительные испытания, выполняемые для ограниченного числа образцов, а иногда и одного образца, как эквивалент испытаниям большого количества однотипных изделий в различных режимах. Поскольку испытания проводятся на высокой частоте без использования сложных и сравнительно малонадежных систем формирования механических нагрузок



(сам образец является источником механических нагрузок в нем), возможно проведение многоцикловых и гигацикловых испытаний за небольшое время и при низких затратах на оборудование.

Испытание материалов и конструктивных элементов мощного электрооборудования, обычно ориентированного на непрерывную эксплуатацию в течение длительного срока, является длительной и затратной технической задачей. Именно элементы электрооборудования наиболее критичны к воздействию циклических нагружений, и для них устанавливают пороговые уровни допустимой интенсивности вибрации существенно более низкие по величине, чем для других видов роторного оборудования [17]. Эта задача становится особенно актуальной в связи явлениями гигацикловой усталости [2, 15], исследование которой связано с большим (более  $10^9$ ) числом циклов. При этом повреждение конструкционных материалов может происходить при существенно более низких уровнях динамических нагрузок по сравнению обычными статическими и малоцикловыми динамическими нагрузками. При испытаниях на гигацикловую усталость обычно применяют дорогостоящие специализированные стенды с ультразвуковым механизмом возбуждения колебаний. Это весьма затрудняет процедуру исследования материалов на циклическую прочность. Кроме того, такие испытания для реальных элементов конструкций и для условий, близких к условиям эксплуатации, когда одновременно на проводящий конструктивный элемент кроме механических нагрузок действуют повышенные температуры и электрический ток, оказывающий, например, коррозионное воздействие.

Этих недостатков могут быть лишены методы исследования материалов и элементов, основанные на прямом возбуждении механических колебаний в металлических образцах при пропускании через них импульсных токов [18–20]. Применение таких методов позволяет организовать параллельные испытания большого количества образцов, а поскольку колебательные процессы при этом соответствуют критериям эргодичности, общее время испытаний может быть существенно сокращено. Кроме того, рассматриваемая методика легко может быть адаптирована для проведения испытаний на местах эксплуатации. Например, возможно возбуждение динамических колебательных процессов в отдельных шинах мощных генераторов установленных в пазах статора, покрытых изоляцией для неразрушающего контроля качества расклиновки.

При выполнении данной работы были проведены исследования по выбору оптимальных средств контроля вибрации, параметров действующего импульса тока, статистического анализа результатов измерений. Было исследовано влияние геометрических размеров и конструкции образцов (цилиндрические сплошные и полые, плоские) и материала (медь, латунь, сталь, титан, золото, серебро) на особенности возбуждаемых виброакустических колебаний. Показано, что корректная оценка как вибрации, так и магнитного поля, создаваемого импульсными токами, может быть выполнена в виде размаха для каждого отдельного импульса.

На рисунке 5 показана последовательность вибрационных колебаний (радиальной и осевой компонент) и отклика на действие импульсов тока с частотой один килогерц. Получаемые оценки эргодических виброакустических процессов могут быть использованы как оценки динамических механических деформаций.

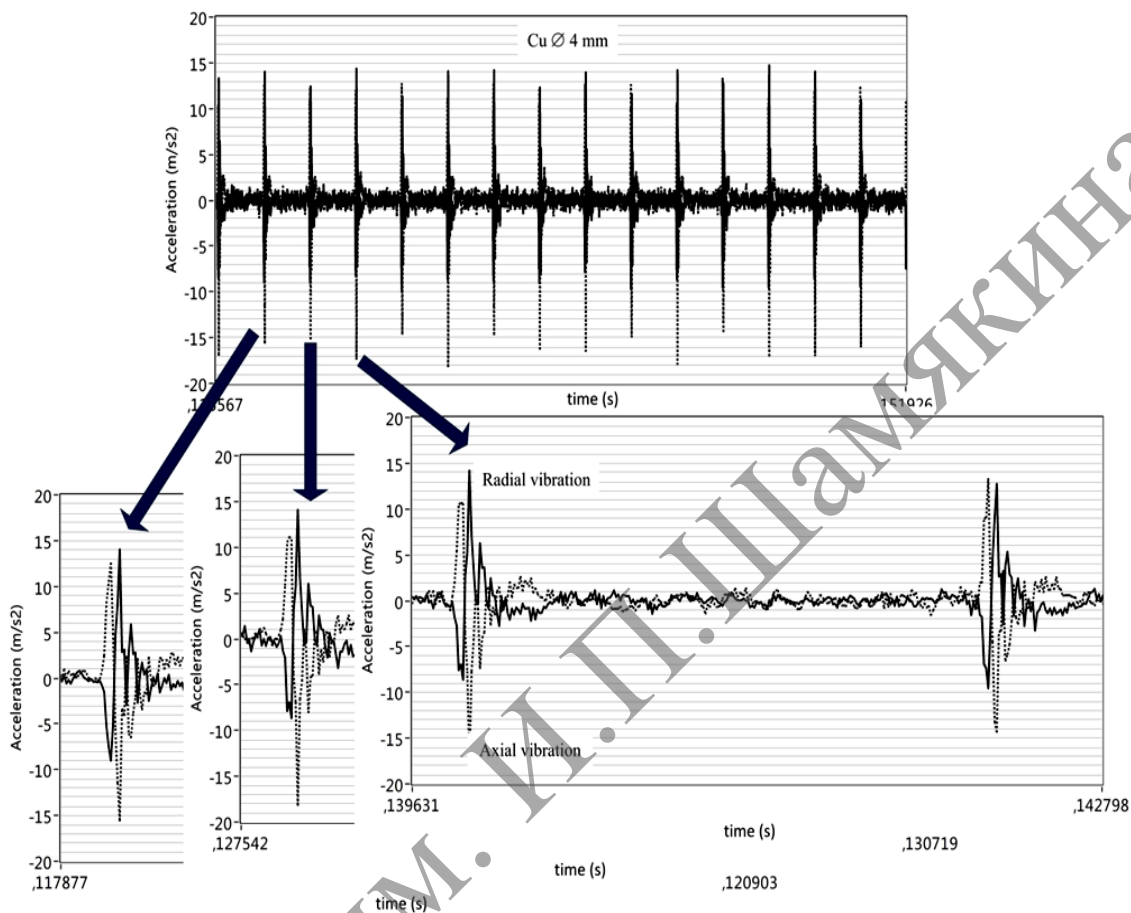


Рисунок 5. – Последовательность вибрационных импульсов

Результирующие виброакустические колебания от каждого импульса могут быть представлены как суперпозиция независимых колебательных затухающих процессов, формируемых во время прохождения переднего и заднего фронтов импульса тока. Изменения продолжительности импульса позволяют в значительных пределах управлять амплитудой результирующих колебаний [21].

Обеспечение вибрационной прочности мощного энергетического оборудования предполагает не только предварительное испытание используемых для их построения материалов, но и исследование их динамических характеристик на макетах, изготовленных образцах и на промышленном оборудовании в процессе его эксплуатации, например, после проведения регламентных ремонтных работ [22]. При проведении таких испытаний необходимо задание внешних динамических нагрузок с применением вибраторов или формирователей ударных импульсов [23, 24].

Существующие методы позволяют оценить различные характеристики, такие, как динамическая жесткость, резонансные частоты, декременты затухания и т. д. В частности, такие методы используются при испытаниях электротехнического оборудования [25]. Воздействия в виде удара, имеющие широкий спектральный состав при использовании их в качестве повторяющегося воздействия могут в перспективе дать возможность оценить устойчивость материала и конструкции как к периодическим, так и к нестационарным нагрузкам, возникающим при пусковых и переходных режимах. Возможность получить такие воздействия в элементах и их физических моделях при пропускании импульсных токов, порождающих механические колебания, позволяет отказаться от сложного оборудования формирования механических воздействий, таких, как вибраторы или генераторы механических ударов, которые часто невозможно использовать на реальных конструкциях, в частности из-за, наличия элементов крепления и изоляции. Последнее не позволяют получить непосредственный доступ к элементам обмотки, которые испытывают в процессе работы динамические нагрузки. В данной работе приводятся результаты оценки возможности использования статистических методов анализа механического отклика на действие импульсного тока в повторяющемся режиме. В перспективе такие методы могут найти применение при испытании оборудования без демонтажа элементов для таких видов мощного оборудования, как моторы, генераторы и трансформаторы, например, с использованием штатных средств вибрационного контроля. Экспериментальное исследование физических моделей с анализом статистических характеристик процессов можно рассматривать в качестве первого шага в направлении создания методов неразрушающего контроля сложного электротехнического оборудования без их демонтажа.

#### **7.4. Использование статистических методов для анализа механического отклика на действие импульсных токов**

Исследования, выполненные в течение последнего десятилетия, показали, что большая часть конструкционных материалов при лабораторных исследованиях в условиях мало и многоциклового усталости демонстрировали наличие предела усталости. Это позволяло установить для такого оборудования нормы по предельно допустимым динамическим нагрузкам. В реальных условиях эксплуатации для очень большого количества циклов, а также при наличии коррозионных процессов наблюдается отсутствие предела усталости [2, 15]. Для объяснения нетипичных прочностных характеристик при большом числе циклов нагружения предложен ряд гипотез, связанных с влиянием внешней среды на поверхностные дефекты [26] или переходом к развитию скрытых в объеме дефектов [27]. Дальнейшее исследование этого вопроса, в том числе с учетом влияния внешней среды, требует проведения большого объема экспериментальных работ и статистической обработки результатов. Применимость некоторых статистических методов анализа к испытаниям образцов на механические нагрузки при действии импульсных токов, когда сам образец является источником таких нагрузок позволяет провести большой объем исследований без привлечения испытательных машин и в условиях различных внешних воздействий.

Элементы обмоток испытывают в процессе работы значительные динамические нагрузки в виде ударов и вибрации [13, 14]. Сами обмотки обычно выполнены в виде сплошных или полых стержней из меди. Элементы в виде трубки могут использоваться в режиме воздушного или жидкостного охлаждения обмотки. Реальная эксплуатация связана с воздействием не только механических, но и больших тепловых и электрических нагрузок, в свою очередь инициирующих процессы коррозии и механических изменений.

Использование стандартных решений для испытания таких элементов требует выполнения длительных испытаний, поскольку они проводятся на сравнительно низких частотах нагружения с применением сложного оборудования для формирования механических нагрузок [28].

Проведение испытаний мощного энергетического оборудования [17] и испытание такого оборудования на усталостную прочность при эксплуатационных режимах [12], предполагают возможность одновременного воздействия как механических вибрационных нагрузок, так и действие больших токовых нагрузок, которые могут сопровождаться механическим действием этих токов. Рассматриваемая методика позволяет приблизить условия проведения испытаний к режимам, в которых работает мощное энергетическое оборудование при эксплуатации.

Использование явлений, связанных с пинч-эффектом действия импульсного тока, позволяет реализовать значительные динамические

нагрузки в электропроводящих элементах при высокой частоте воздействия импульсных токов [12, 13]. Увеличение тока в пределах значений типичных для рабочих токов элементов обмоток позволяет реализовать режимы, близкие к режимам реальной эксплуатации, и значительно ускорить испытания.

Если рассмотреть в качестве реального объекта стержень генератора мощного гидроагрегата, то можно указать, что это медная шина с внешними размерами порядка 50–70 мм в поперечном сечении и порядка 2 м длиной, работающая при токе 10–20 КА. Физическая модель такой шины в масштабе 1:10 представляет собой сплошной или полый стержень диаметром 5–7 мм и длиной 200–300 мм. В отдельной шине динамические нагрузки формируются за счет пинч-эффекта, величина которого зависит от плотности тока, и сравнимые нагрузки могут быть получены при токах в несколько сотен ампер. Поскольку испытание выполняется с использованием импульсных токов высокой скважности при напряжении, как правило, не превышающем двадцати вольт, общая потребляемая мощность оказывается сравнительно небольшой, а испытательная установка и сами испытания не требуют большого помещения и затрат. Как показано в [14], при испытании конструкций на механические воздействия виде вибрации общепринятые зависимости в виде диаграмм «число циклов-напряжение» (S-N диаграммы) можно заменить на диаграммы зависимости «число циклов – ускорение». Контроль динамических нагрузок по измеряемому ускорению существенно упрощает измерительную аппаратуру, которая может быть заменена на обычные датчики вибрации-акселерометры, подключенные к устройству сбора и обработки данных на основе компьютера с пакетом LabVIEW. Подробное описание методики испытаний приведено в [30–34].

Для оценки возможности использования рассматриваемой методики испытаний сплошные и трубчатые медные образцы подвергались воздействию импульсных токов, причем частоту и длительность импульсов, а также их амплитуду можно было регулировать. Величина колебаний контролировалась трехкомпонентным акселерометром, установленным на испытываемом образце. Использование трехкомпонентного акселерометра обеспечивало независимый контроль радиальной, осевой и касательной составляющих ускорения. Сигналы ускорения при необходимости могли быть преобразованы с использованием однократного или двойного интегрирования в сигналы, пропорциональные скорости (что позволяет оценить энергию колебаний) или перемещения (что соответствует деформации образца).

Основным контролируемым параметром является амплитудное (пиковое) значение ускорения, поскольку именно эта величина является критически важным параметром при испытании конструкций на воздействие вибраций [17].

Поскольку предлагаемая методика испытаний позволяет легко менять режим, общее воздействие может быть оценено с использованием гипотезы



линейного суммирования повреждений [14], при которой испытание разбивается на отрезки с постоянной нагрузкой  $\sigma_i$  и общий уровень повреждения определяется в виде суммы отношений:

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{n_i(\sigma_i)}{N_i(\sigma_i)}, \quad \text{при } D=1 \quad (10),$$

где  $N_i(\sigma_i)$  – число циклов нагружения с величиной напряжения  $\sigma_i$ , при котором происходит потеря прочности (соответствует  $D=1$ ). Переход от механических напряжений к пиковым значениям ускорения  $a_i$ , частоте импульсов  $f_i$  и времени действия импульсов  $t_i$  позволяет представить выражение (1) в виде:

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{n_i(a_i)}{N_i(a_i)} = \sum_{i=1}^K \frac{t_i \cdot f_i(a_i)}{T_{MAX} [f_i(a_i)] \cdot f_i(a_i)}, \quad \text{при } D=1 \quad (11)$$

Данная гипотеза была развита для случая непрерывного изменения параметров воздействия в работах [31, 32]. Для этого случая необходимо знать статистические характеристики, а именно функцию распределения плотности вероятности амплитуд импульсного воздействия.

Закон распределения плотности вероятности амплитуд зависит от соотношения сигнал/шум  $q = A_{CP} / \sigma_N$  и в общем случае соответствует закону Релея-Райса [33]:

$$p(A) = \frac{A}{\sigma_N^2} \exp\left[-\frac{(A^2 - A_{CP}^2)}{2\sigma_N^2}\right] \cdot I_0\left(\frac{A \cdot A_{CP}}{\sigma_N^2}\right) \quad (12),$$

где  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя комплексного аргумента,  $\sigma_N$  среднее квадратичное отклонение оценок амплитуды.

Если случайные составляющие большие (т. е. при  $q=0$ ), то распределение плотности вероятности соответствует закону Релея.

При проведении испытаний на воздействие механических напряжений величина тока выбирается существенно более низкой, чем та, при которой происходит быстрое разрушение образцов, как это описано в работах [28, 34], но при этом уровень воздействия достаточен для того, чтобы отчетливо наблюдать механические эффекты над шумами каналов контроля вибрации.

Оценка вибрации формируется в виде пикового значения:

$$x_{PEAK} = \max |x(t_i)| \quad (13)$$

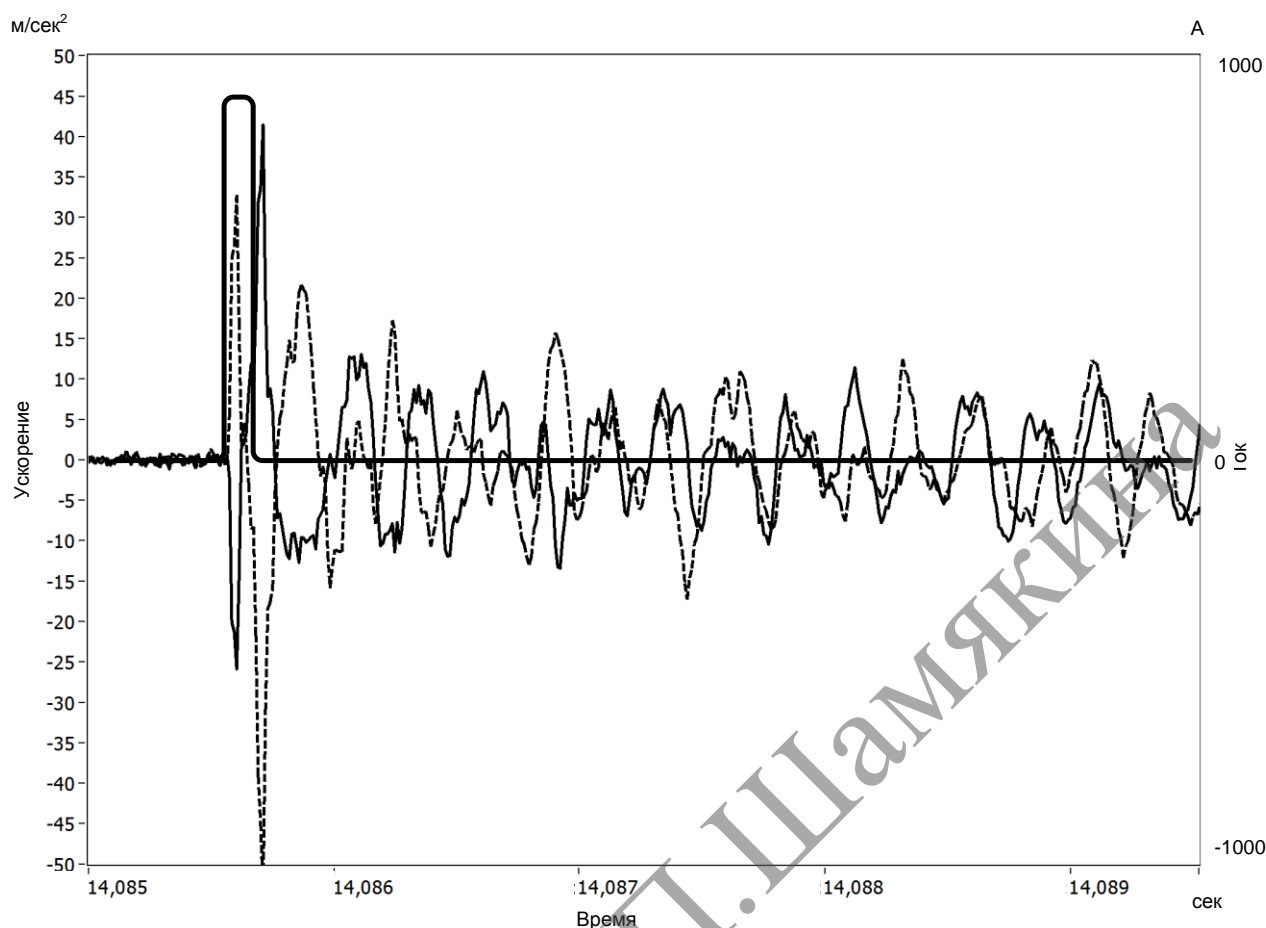
или размаха:

$$x_R = \max [x(t_i)] - \min [x(t_i)] \quad (14)$$

При наличии значительных случайных выбросов, например, импульсных помех можно использовать оценку в виде межквартильного размаха:

$$\tilde{x}_Q = Q_3 - Q_1 \quad (15),$$

где  $Q_1$  и  $Q_3$  соответственно 25-ый и 75-ый перцентили.



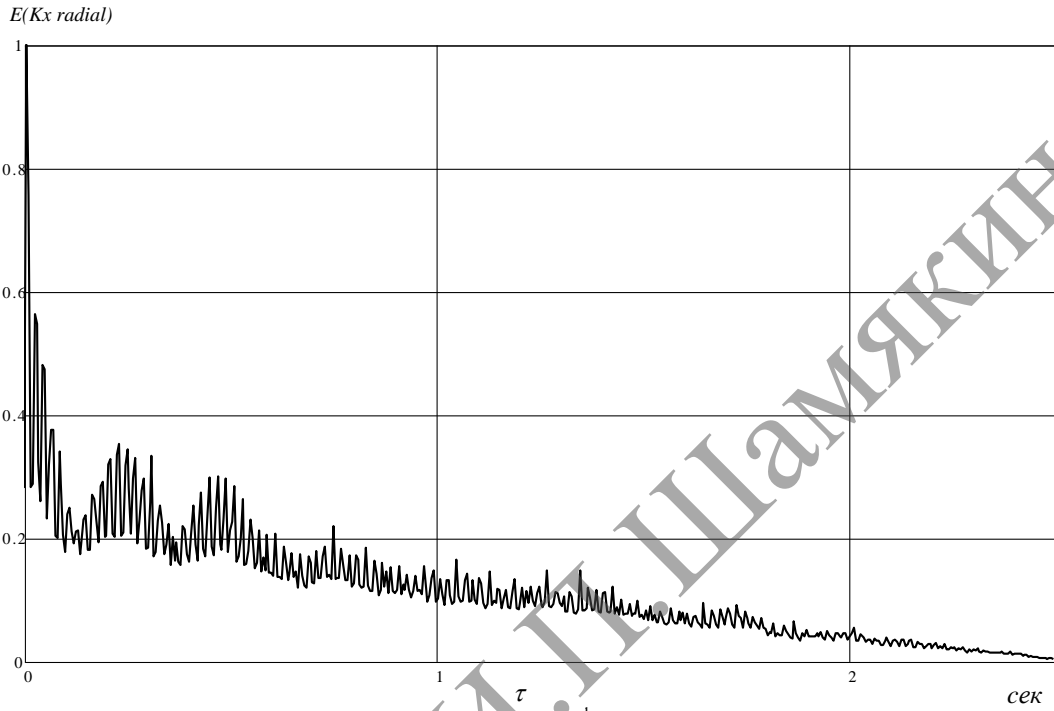
**Рисунок 6. – Временные диаграммы ускорения в радиальном (тонкая сплошная) и осевом (пунктирная) направлениях для импульса тока (жирная сплошная)**

На рисунке 6 показаны зависимости ускорения от времени. При малой длительности сигналы становятся несимметричными относительно нулевого уровня, так как на фронтах импульса тока важное значение имеет скин-эффект, а при достаточно большой продолжительности положительные и отрицательные импульсы становятся приблизительно равными, так как процессы деформации, связанные с пинч-эффектом, успевают завершиться, поскольку перераспределение тока по сечению проводника успевает закончиться.

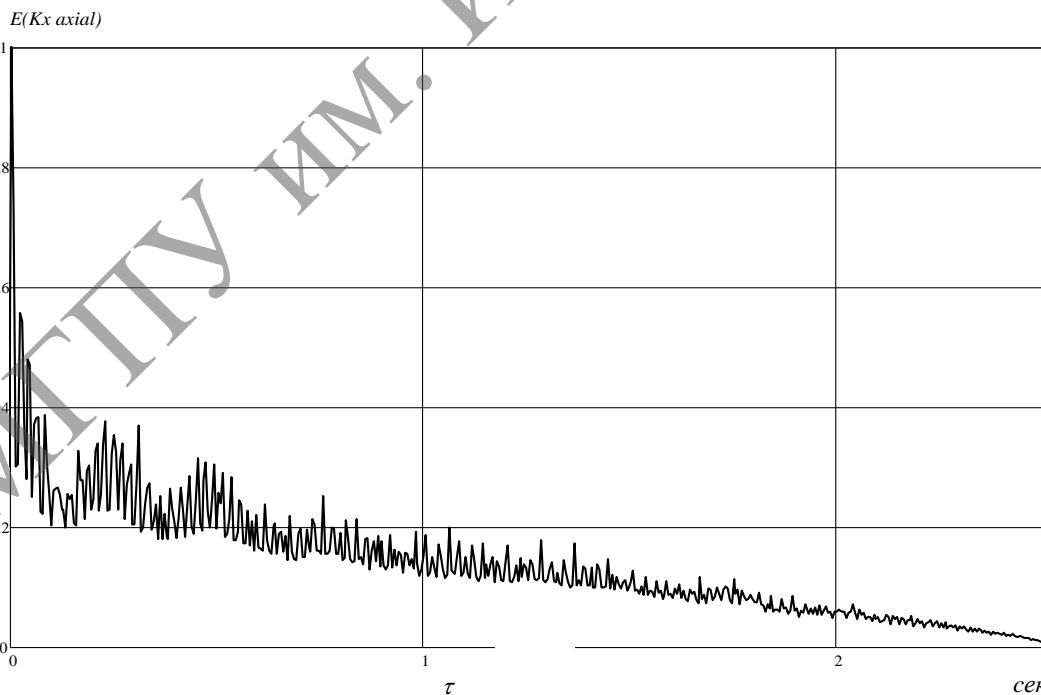
После окончания действия импульса тока в образце наблюдаются колебательные процессы, связанные с распространением колебаний на частотах, соответствующих собственным частотам колебаний образца. Эти результаты показывают, что длительность импульсов тока следует выбирать достаточной для обеспечения симметричного вибрационного отклика, что позволяет рассматривать процесс как центрированный, для которого размах (13) соответствует удвоенной амплитуде (12) [35].

Важное значение имеет статистическое обоснование возможности применения длительных испытаний с распространением их результатов на большое количество параллельно работающих в реальном оборудовании однотипных образцов (стержней обмоток упомянутого оборудования).

Предлагается сократить объем испытаний и количество испытательных образцов без потери получаемой информации путем изменения плана эксперимента на основании представления об испытании материалов как об эргодическом стационарном процессе, для которого допустима замена традиционного осреднения информации по множеству реализаций осреднением информации по времени [8].



а)



б)

Рисунок 7. – Огибающая автокорреляционной функции случайного процесса радиальной (а) и осевой (б) вибрации



На рисунке 7 в качестве примера приведены зависимости огибающей автокорреляционной функции радиального и осевого соответственно ускорения поверхности медных образцов, испытывающих действия импульсного тока. Огибающая рассчитывается по соотношению:

$$E[Kx(\tau)] = \sqrt{Kx(\tau)^2 + H[Kx(\tau)]^2} \quad (16)$$

где  $H[Kx(\tau)]$  – преобразование Гильберта от функции автокорреляции  $Kx(\tau)$ .

Увеличение частоты импульсов позволяет обеспечить проведение гигацикловых испытаний за время порядка одной недели или месяца.

Параметры вибрационного воздействия на образец легко могут перестраиваться изменением настройки задающего генератора, управляющего формирователем импульсов тока.

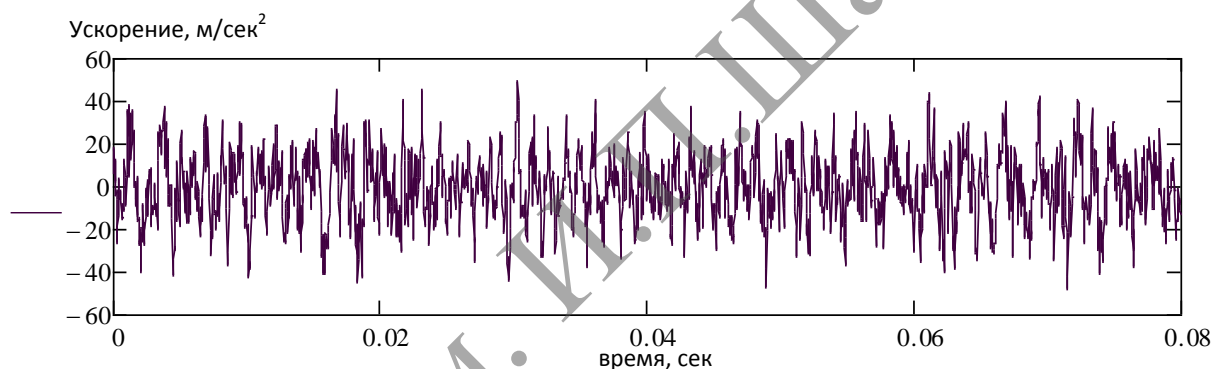
### **7.5. Исследование сложных сигналов вибрационных датчиков статистическими методами**

Исследование статистических свойств последовательностей импульсных воздействий показывает, что происходящие процессы соответствуют критериям стационарности и эргодичности, что позволяет рассматривать длительные испытания, выполняемые для ограниченной партии образцов, а иногда и одного образца, как эквивалент испытаниям большого количества однотипных изделий в различных режимах. Поскольку испытания проводятся на высокой частоте без использования сложных и сравнительно малонадежных систем формирования механических нагрузок (сам образец является источником механических нагрузок в нем), возможно проведение многоцикловых и гигацикловых испытаний за небольшое время и при низких затратах на оборудование.

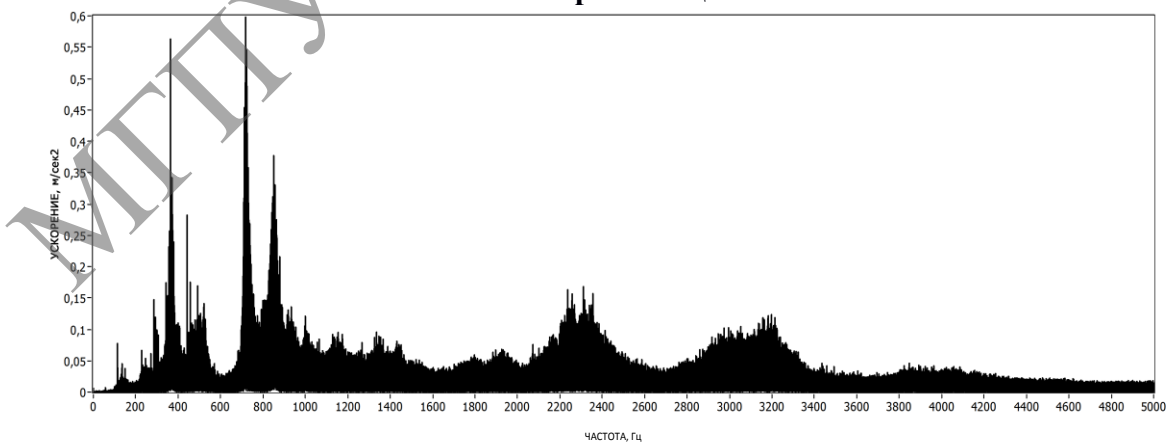
Значительная часть вибрационных процессов и соответствующие им сигналы вибрации, регистрируемые измерительной аппаратурой, в том числе и аппаратурой непрерывного мониторинга вибрации, существенно отличаются от простых гармонических сигналов. Например, вибрация на элементах турбоагрегатов мощных гидроагрегатов связана как с механическим вращением ротора, так и с большим количеством других источников: вибрацией лопаток направляющего аппарата, вибрацией лопастей ротора турбины, пузырьковой кавитацией и кавитацией Кармана в рабочей камере, гидроупругими колебаниями и жгутовой кавитацией в водоотводящей части и т. д. Большое количество факторов и их случайный характер приводят к сложным процессам, которые проявляются в сигналах вибрационных датчиков. На рисунке 8 приведена небольшая часть реализации вибрационного сигнала. Сложный гармонический состав сигнала подтверждается его спектром, который представлен на рисунке 8. Следует отметить, что стандартная полоса контроля вибрационного сигнала для гидроагрегатов в настоящее время равна 0,5–200 Гц [36, 37]. Представленный

спектр показывает, что вне этой полосы имеется много значимых дискретных и полосовых составляющих. При решении задач вибрационной защиты полоса частот контролируемой вибрации зачастую ограничивается частотами в 20–30 Гц [38]. Как правило, в качестве контролируемого параметра используют оценки уровня виброперемещения, однако исключение из рассмотрения значительных составляющих в виде виброускорения, определяющих локальные значительные динамические силы в месте измерения на элементах конструкции, представляется неоправданным.

В качестве датчиков вибрации при вибрационном мониторинге гидроагрегатов применяются акселерометры различного типа. Для получения данных о виброперемещениях сигнал таких датчиков необходимо подвергнуть двойному интегрированию, что существенно снижает вклад в общий уровень высокочастотных составляющих и увеличивает значимость низкочастотных составляющих. В результате такой обработки воздействие высокочастотной вибрации высокого уровня, а также кратковременных выбросов вибрации может быть не зафиксировано системой мониторинга.



**Рисунок 8. – Пример вибрационного сигнала на корпусе турбины гидроагрегата.  
Часть реализации**



**Рисунок 9. – Спектр вибрационного сигнала представленного на рисунке 8**

Для сложных сигналов типично проявление всплесков в уровне сигналов, характеризующих соответствующие процессы [30]. Для такого

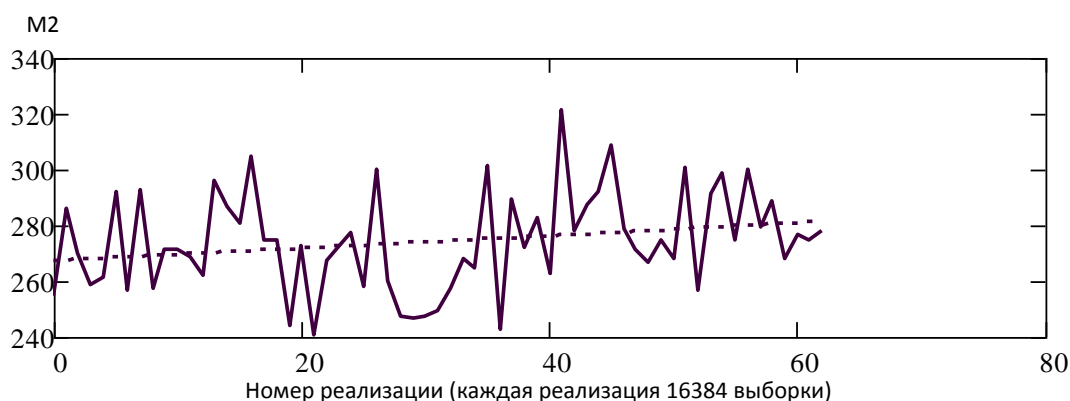
явления в указанной работе было предложено понятие перемежаемости, в соответствии с которым моменты в большими пиковыми значениями, в нашем случае процессы вибрации, могут концентрировать в себе большую часть энергии колебаний, а следовательно и оказывать существенное влияние на вибрационную прочность конструктивных элементов. Для исследования статистических свойств таких процессов рационально применить методы анализа экстремальных значений в случайных процессах [35, 40].

Необходимость учета экстремальных значений вибрации при анализе вибрационных процессов сложного состава отмечена в нормативной литературе. В [38] для таких сигналов предлагается использовать «среднее пиковое» значение, а в [41] рекомендуется при измерении средних значений в качестве оценки уровня вибрации выбирать максимальное из полученных средних значений. Выбор таких оценок существенно зависит от рассматриваемой длины реализации, используемой для получения элементарной оценки. Для корректного выбора таких реализаций необходимо предварительно выполнить анализ статистических свойств сигналов. Необходимо оценить их стационарность по величине выборочных оценок первого и второго статистических моментов. На рисунке 10 и 11 приведены примеры таких зависимостей для относительно небольшого интервала времени, равного 40 секундам, и содержащего более  $10^6$  выборок.

Из представленных зависимостей видно, что для моментов  $M1$  и  $M2$  характерно на рассматриваемом интервале времени наличие незначительного тренда. Анализ аналогичных данных для существенно больших реализаций показывает, что даже при наличии изменения режимов работы условие стационарности по параметрам  $M1$  и  $M2$  выполняется с удовлетворительной точностью.

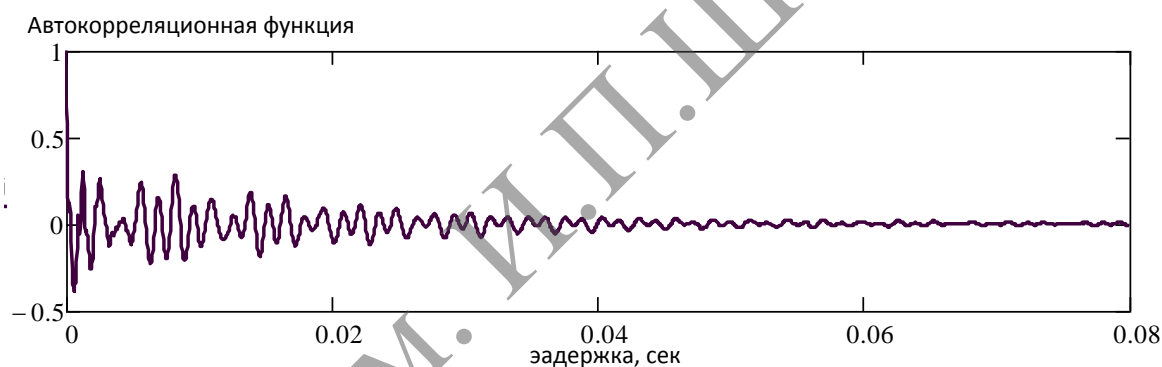


**Рисунок 10. – Зависимость первого статистического момента от времени для последовательности реализаций (пунктир-линейная регрессия оценок)**



**Рисунок 11. – Зависимость второго статистического момента от времени для последовательности реализаций (пунктир-линейная регрессия оценок)**

Кроме оценок статистических моментов для оценки возможностей анализа сигналов, целесообразно рассмотреть автокорреляционную функцию сигнала [42, 18]. Пример такой функции для рассматриваемого сигнала представлен на рисунке 12.



**Рисунок 12. – Зависимость автокорреляционной функции вибрационного сигнала от величины задержки**

Постоянство статистических моментов и стремление автокорреляционной функции к нулю для увеличивающейся задержки позволяют отнести рассматриваемый сигнал к эргодическим. Это позволяет применить к нему теорему Биркгофа-Хинчина [8, 43], в соответствии с которой длительные исследования вибрационного процесса в рассматриваемом агрегате можно рассматривать как аналог статистического испытания группы таких агрегатов. При выборе необходимо также учитывать тенденцию к переходу к мониторингу нестационарных процессов вибрации [41] и общую направленность к повышению информативности при снижении длины анализируемых реализаций [8].

Вибрационные сигналы сложного роторного оборудования являются аддитивной смесью полигармонических и случайных составляющих с широким частотным спектром. Такие сигналы близки к эргодическим, и их

сбор и анализ системами непрерывного мониторинга вибрации позволяет рассматривать их статистические характеристики в качестве результатов длительных испытаний в условиях реальной эксплуатации. Сложный характер сигналов предполагает использование в качестве характеристики уровня вибрации оценки экстремальных (пиковых) оценок сигнала. Необходимость учета наряду со стационарными режимами и нестационарных, а также развитие алгоритмов защиты по вибрации требует дальнейшего совершенствования методов достоверной оценки пиковых значений на коротких реализациях.

В настоящее время широкое распространение получили преобразователи электрической энергии в механическую различного типа. Наибольшее распространение имеют устройства электромагнитного и электродинамического типа (соленоиды, реле, двигатели постоянного и переменного тока, вибровозбудители электродинамического типа). Такие устройства при относительно простом исполнении обеспечивают высокий КПД преобразования и по существу являются основой современной техники и машиностроения. Для возбуждения более высокочастотных колебаний широкое применение получили устройства, основанные на явлении магнитострикции и обратного пьезоэлектрического эффекта (пьезоэлектрические возбудители) которые обеспечивают генерацию механических колебаний в высокочастотной области спектра. Существенно меньше известно о еще одном типе генерации механических колебаний, связанном с явлением пинч-эффекта в металлических проводниках при прохождении через них тока [12]. Такие процессы, как показывает эксперимент [20], порождают осевые и радиальные вибрации. Меньшее внимание к явлениям пинч-эффекта, видимо, связано с относительно низкой эффективностью такого преобразования и формирования механических колебаний и тем, что такие процессы сопровождаются значительным выделением тепла при прохождении тока через проводник. В результате эффективность преобразования электрической энергии в механическую оказывается в  $10^3$ – $10^6$  раз ниже, чем, например, у пьезоэлектрических возбудителей. Несмотря на это, явление пинч-эффекта можно с высокой достоверностью фиксировать и исследовать. При этом важно учитывать, что процессы, при которых проявляется импульсный пинч-эффект одновременно, сопровождаются и сложной совокупностью как чисто механических, которые требуют привлечения методов структурной механики, так и электрических (скин-эффект) и тепловых (Джоулево выделение тепла). Тем не менее, учитывать механические эффекты, порождаемые пинч-эффектом, видимо, следует в целом ряде практических применений, прежде всего связанных с прохождением больших токов, например, при сварке или механической обработке проволоки с нагревом электрическим током.

Еще одной областью, где может проявиться негативное влияние пинч-эффекта в металлических проводниках – вибрация выводов обмоток мощного энергетического оборудования, которую контролируют

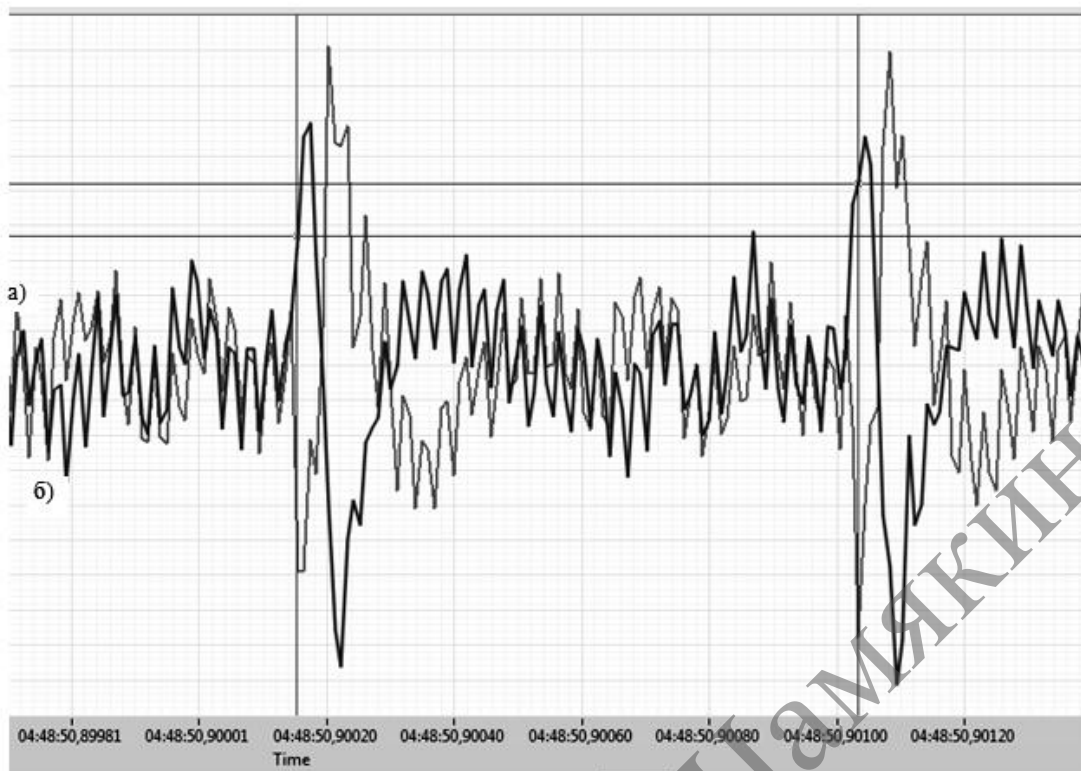
периодически или непрерывно. Такие обмотки работают при напряжениях 10–100 КВТ токах 15–20 КА, поэтому пинч-эффект может быть одной из причин, порождающих такую вибрацию. Преобладающим видом такой вибрации в трансформаторном оборудовании и электрогенераторах мощных электростанций является гармоническая вибрация на частоте 100 (120) Гц, т.е. удвоенная частота переменного тока.

Особенно сильные проявления механического отклика на прохождение тока могут быть связаны случаем импульсного тока, проходящего через проводник. Это связано с проявлением скин-эффекта, при котором изменяющийся ток вызывает неравномерное распределение тока по сечению проводника и быстроменяющиеся токи распространяются в основном в поверхностном слое проводника, где плотность тока оказывается существенно выше и, соответственно, пинч-эффект проявляется сильнее (как в случае проводника в виде трубки). Это положение приобретает особую актуальность в связи с быстрым развитием такого направления в энергетике, как использование генераторов с меняющейся скоростью вращения, которые генерируют напряжение и ток нестабильной частоты с последующим преобразованием мощности в ток стандартной частоты весьма мощными электронными преобразователями, например тиристорными. Работа таких тиристорных узлов связана с возникновением очень больших импульсов тока, которые могут породить соответствующие вибрации, в том числе и за счет пинч-эффекта. При этом колебания могут быть как на вынужденной частоте, так и на собственной частоте конструктивных элементов и могут быть причиной снижения надежности работы, в то время как безотказная работа мощного энергетического оборудования является приоритетной задачей предотвращения техногенных катастроф.

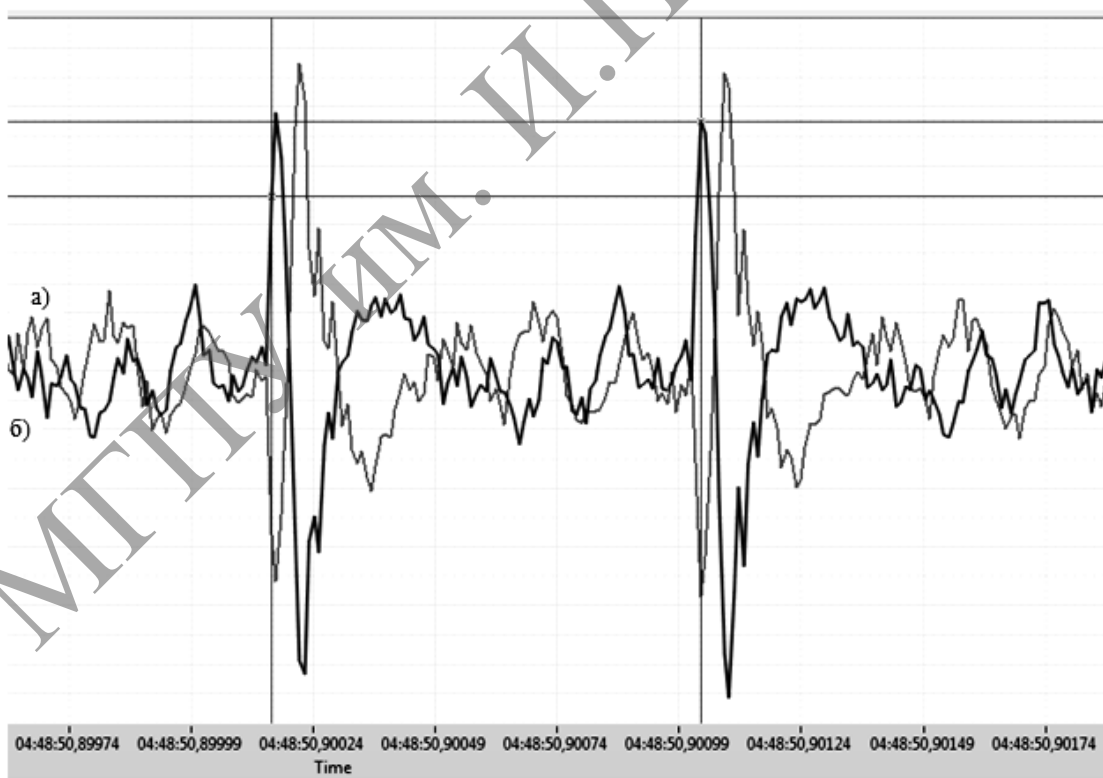
#### **7.6. Оценка преобразования электрической энергии импульсного тока в механическую энергию**

Контроль вибрационного отклика на прохождение импульсов тока в силу перечисленных обстоятельств и сложным совокупным характером явлений сопровождается сложной совокупностью как собственно процессов вибрации, так и воздействия помех и шумов на результаты измерений, что делает прямые измерения практически невозможными и для получения достоверной информации предполагает использование предварительной обработки получаемой информации и последующего статистического анализа.





**Рисунок 13. – Импульсы ускорения в радиальном (а) и осевом направлении (б) для периодического возбуждения импульсного тока 1 КА в медном образце диаметром 4 мм.**



**Рисунок 14. – Импульсы ускорения в радиальном (а) и осевом направлении (б) для периодического возбуждения импульсного тока 1 КА в медном образце диаметром 4 мм, после фильтрации высокочастотной помехи импульсного источника питания (30 КГц)**

К сожалению, для сигнала сложной формы отсутствуют простые, поддающиеся формализации критерии выделения значимых пиков в реализации на фоне большого количества пиков от случайных составляющих. В [38] приведено описание процедуры подсчета пиковых значений и среднего пикового значения, но его применимость довольно ограничена, особенно когда амплитуда аддитивной помехи и ее частота неизвестны или число «полезных» импульсов неопределенно или они непериодические, а именно такая ситуация типична в рассматриваемом нами случае при возбуждении одиночных импульсов и при низком уровне импульсного тока, когда случайные составляющие сопоставимы с амплитудой откликов. С учетом изложенного формируются следующие статистические оценки вибрационных процессов:

$$\tilde{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x(t_i) \quad \text{среднее арифметическое}$$

$$\tilde{x}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x^2(t_i)} \quad \text{среднее квадратичное}$$

$$x_{PEAK} = \max |x(t_i)| \quad \text{пиковое значение}$$

$$x_R = \max [x(t_i)] - \min [x(t_i)] \quad \text{размах}$$

$$\tilde{x}_R = \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^K \{ \max [x(t_i)] - \min [x(t_i)] \} \quad \text{средний размах}$$

где  $i \in (j-1) \cdot N \dots j \cdot N$ .

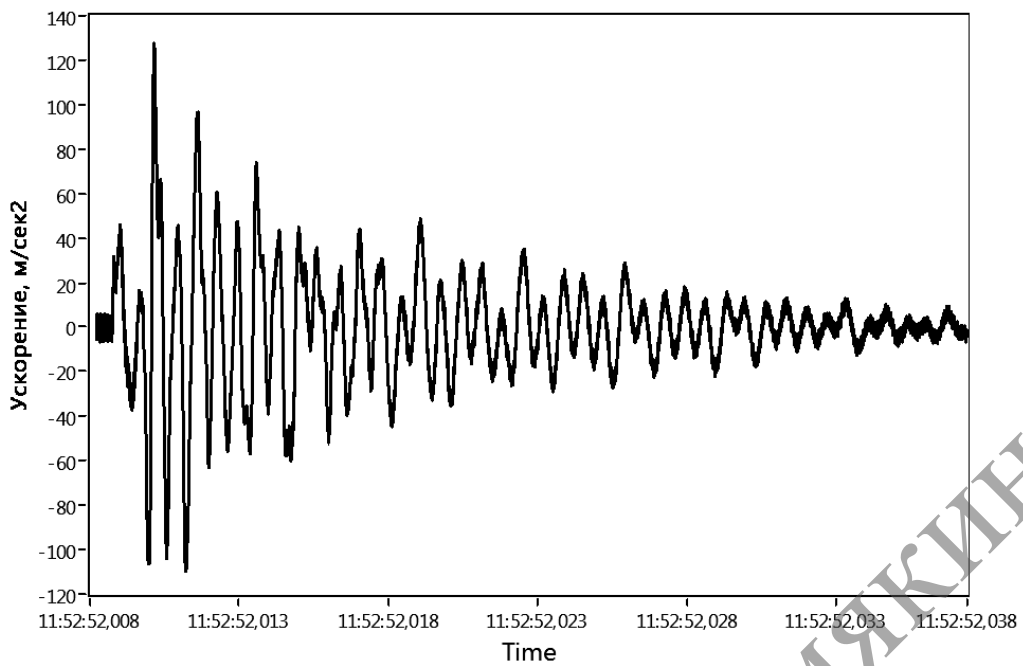
Причем для оценки отклика на действие импульсного тока при одиночном импульсе наиболее удобна оценка по пиковому значению (или размаху).

Таким образом, имеется задача выработки процедуры автоматического выделения пиковых значений в реализации, оценки их числа и выбора статистического параметра, среднее, медиана, максимум для характеристики статистически обоснованного критерия уровня отклика. Необходимо также показать, что подобная оценка обоснована и может заменить большое количество последовательных измерений для идентичных похожих образцов.

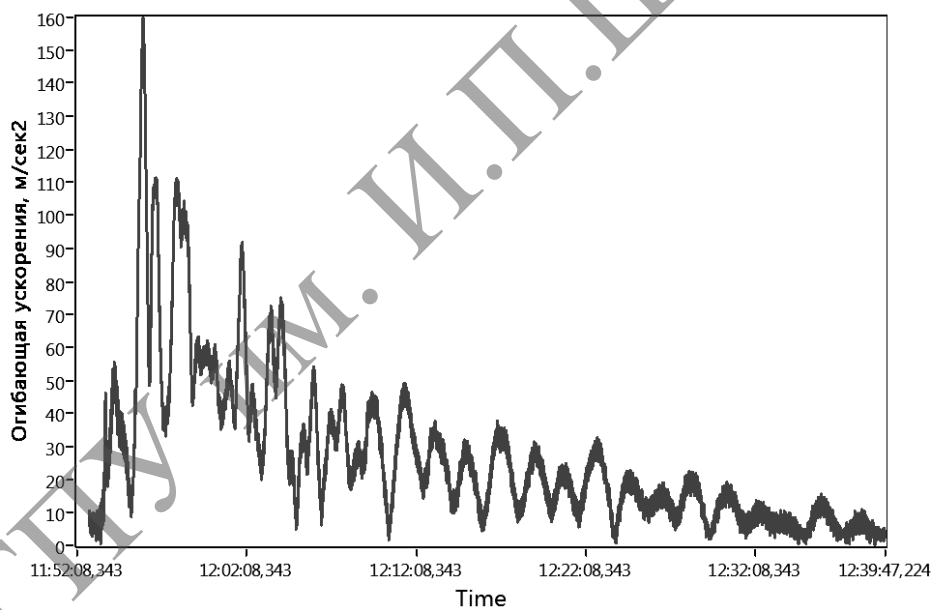
Фактически мы имеем в одной реализации указанное количество замеров.

Как уже отмечалось, с учетом колебательного процесса вибрационного отклика на пропускание импульса ток, типичный пример которого приведен на рисунке 15, при оценке сходимости к нулю автокорреляционной функции при подтверждении эргодичности сигнала удобно перейти к функции огибающей для сигнала, которая представлена на рисунке 16.





**Рисунок 15. – Радиальное ускорение вибрационного отклика проводника на пропускание импульса тока**



**Рисунок 16. – Огибающая радиального ускорения для сигнала представленного на рисунке 15**

### Использованная литература:

1. Ускорение поверхностных слоев и вибрация металлического проводника под влиянием пинч-эффекта действия импульсного тока / О.А. Троицкий [и др.] // Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел-научное наследие Ю.Н. Работнова: тезисы конференции. – М.: Изд. ИМАШ РАН, 2014. – С. 106–107.
2. Bathias, Claude. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / Claude Bathias, Paul Croce Paris // September 13, 2004 by CRC Press – 328 p.
3. Правоторова, Е.А. Метод минимизации количества трибологических испытаний / Е.А. Правоторова, И.А. Буяновский // ТСММ. – 2009. – № 3. – С. 15–20.
4. Биллингслей, П. Эргодическая теория и информация / Б. Биллингслей: пер. с англ. – М.: Изд-во Мир, 1969. – 237с.
5. Синай, Я.Г. Современные проблемы эргодической теории / Я.Г. Синай. – М.: изд-во Мир, 1995. – 208 с.
6. Аносов, Д.В. О спектральных кратностях в эргодической теории / Д.В. Аносов // Мат. Институт им Стеклова, серия Совр. пробл. Математики. – 2003. – Вып. 3. – 86 с.
7. Зайко, Н.А. Дискретная модель измерения эргодических случайных процессов / Н.А. Зайко // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т. 10, № 2. – С. 172–176.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Академия, 2003. – 480 с.
9. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – 8-е изд. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.
10. Скворцов, О.Б. Выбор параметров контроля вибрации для систем непрерывного мониторинга состояния машин и агрегатов / О.Б. Скворцов // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: научные труды II Международной научной конференции. – ИМАШ РАН, 2012. – С. 412–417.
11. ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.
12. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства): монография / О.А. Троицкий [и др.] – М.: Изд-во АНО ИКИ (Москва–Ижевск), 2004. – Т. I. – 563 с. – Т. II. – 467 с.
13. Троицкий, О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом / О.А. Троицкий // Изв. АН СССР. – 1977. – № 6. – С. 118–122.
14. Ленк, А. Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк, Ю. Ренитц. – М.: Мир, 1976. – 272 с.
15. Vokůvka, O. Gigacycle Fatigue At High-Frequency Loading./ O Vokůvka // Diagnostics. – 2008. – № 4(48). – P. 53–56.

16. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.
17. ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.
18. Правоторова, Е.А. Моделирование виброиспытаний элементов обмоток мощного электрооборудования / Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 5. – С. 103–110.
19. Магнито-механическое действие импульсного тока в проводнике./ О.А. Троицкий [и др.] // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2016): материалы Международной конференции. – М. Изд-во ИМАШ РАН. 2016. – С. 145–148.
20. Измерение магнитного поля и вибраций, созданных им в проводниках за счет пинч-эффекта./ О.А. Троицкий [и др.]// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – Т. 21, выпуск 3. – С. 1361–1363.
21. О.А. Троицкий [и др.] // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 1–1. – С. 137–139.
22. ГОСТ 30630.1.1-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. – 25 с.
23. ГОСТ Р 53190-2008. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. – 23 с.
24. ГОСТ 16483.31-74 Древесина. Резонансный метод определения модулей упругости и сдвига и декремента колебаний. – 5 с.
25. ГОСТ 16962.2-90. Изделия электротехнические. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам.
26. Левин, Д.М. Гигацикловая усталость / Д.М. Левин, И.Ф. Широкий, Л.В. Муравлева // Известия ТулГУ. Серия Физика. – 2006. – Вып. 6. – С. 192–201.
27. Шаняевский, А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов / А.А. Шаняевский.// Научный Вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 179. – С. 32–44.
28. Nasilowski, Jan. Phenomena connected with the disintegration of conductors overloaded by short-circuit current (in Polish)/ Jan Nasilowski // Przegląd Elektrotechniczny. – 1961. – P. 397–403.
29. Скворцов, О.Б. Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments/ О.Б. Скворцов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013": сборник трудов

- ХII международной научно-практической конференции NIDays-2013, Москва 2013 г. – М.: ДМК-пресс, 2013. – С. 78–80.
30. Рунов, Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов / Б.Т. Рунов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 350 с.
  31. Болотин, В.В. Вибрации в технике: справочник: в 6-ти т. / В.В. Болотин. – Т. 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
  32. Федосов, В.П. Использование математических методов в статистической радиотехнике./ В.П.Федосов, В.И. Марчук. – Шахты: ЮРГУЭС, 2008. – 346 с.
  33. Lukyanov, A. Do we need to recourse to Amper-Neumann electrodynamics to explain wire fragmentation in the solid state?/ A. Lukyanov, S. Molokov S // arXiv: physics/0012029v1[physics.class-ph] 14 Dec 2000.
  34. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. – М.: Мир, 1965. – 451 с.
  35. ISO 10816-5:2000. Вибрация механическая. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 5. Агрегаты для гидроэлектростанций и насосных станций.
  36. DIN ISO 7919-5-2005. Механическая вибрация. Оценка вибрации машин с помощью измерений на вращающихся валах. Часть 5. Машинные комплексы на гидроэлектростанциях и насосных станциях.
  37. СТО 17330282.27.140.001-2006. Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций. ОАО РАО «ЕЭС РОССИИ» – Москва, 2006. – 620 с.
  38. Перемежаемость в случайной среде / Я.Б. Зельдович [и др.] // Успехи физических наук. – 1987. – май, Т. 152, вып. 1. – 30 с.
  39. Statistics of extremes: theory and applications/ Jan Beirlant [et al.], from Daniel De Waal, Chris Ferro. John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 504 p.
  40. ГОСТ Р 56646 – 2015 (ИСО 19201:2013). Вибрация. Руководство по выбору критериев оценки вибрационного состояния машин. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 32 с.
  41. Правоторова, Е.А. Оценка статистических характеристик механического действия импульсного тока на модели элементов мощного электрооборудования / Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов // Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы: третья научно-техническая конференция, 21–23 октября 2015 г. – М.: ИМАШ РАН, 2015. – С. 39–40.
  42. Биркгоф, Д. Динамические системы / Д. Биркгоф. – Ижевск: ИД "Удмуртский университет", 1999. – 408 с.

## ГЛАВА VIII. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ (БРИКЕТИРОВАНИЯ) МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

### Введение

Устойчивое развитие мирового хозяйства в условиях ограниченности ресурсов Ecologically Sustainable Industrial Development (ESID) предполагает разработку эффективных технологий получения материалов с новым уровнем свойств, в т. ч. из отходов [1, 2]. Перспективный путь – использование в качестве технологического инструмента потоков энергии большой интенсивности, в т. ч. электрического тока большой плотности, т. е. тока такой величины и длительности, при протекании которого по проводнику или через границу раздела проводников возникают необратимые изменения.

Электрический ток большой плотности более 200 лет широко используется в качестве научного и технологического инструмента. Однако лишь в настоящее время новые результаты исследований на стыке электрофизики, физики плазмы, магнитной гидродинамики и физики конденсированного состояния позволили объяснить природу ряда явлений, возникающих в проводниках при пропускании по ним электрического тока большой плотности, обнаружили ряд новых явлений; они позволяют расширить возможности электрического тока как инструмента для решения современных технологических проблем и оптимизировать технологические процессы [3–5].

Востребованы как дорогостоящие материалы с уникальными свойствами, так и такие, главным достоинством которых является существенно более низкая цена. Снижения цены можно добиться, получая материалы из отходов. В этом случае решается важнейшая задача стратегии устойчивого развития – рециклинг отходов. Новые методы переработки отходов разрабатываются для оптимизации их использования в условиях меняющейся конъюнктуры рынка [6, 7]. Недостаточно эффективно используются металлическая стружка и другие дисперсные или измельченные отходы: всплэсы, облой, листовая обрезь, легковесный лом и т. п. Для того чтобы обеспечить новый уровень свойств получаемых материалов можно использовать иной дисперсный материал, например, гранулированный материал высокой чистоты либо дешевые материалы, в частности, металлическую стружку, естественные свойства которой, такие, как развитая поверхность и наличие макро и микродефектов могут быть полезны при создании ряда изделий, например, каталитических фильтров. Электрический ток может диспергировать металлические проводники (этот процесс используется для получения металлических и пенометаллических гранул [8, 9]), а также компактировать (брикетировать) металлы, превращая дисперсные металлические среды в прочные образцы. Такой подход позволяет получать широкий спектр материалов как из порошков, гранул и

чешуек, так и из отходов. Главное его достоинство – возможность компактирования, без использования защитной среды, любых электропроводящих материалов, в т. ч. твердых и сверхтвердых, хрупких, не формуемых, химически активных (реакционных). Эта технология требует существенно меньших затрат энергии, более проста и технологична, в сравнении с обычным спеканием при высокой температуре и прессованием при высоких давлениях; она позволяет получать материал с большей пористостью.

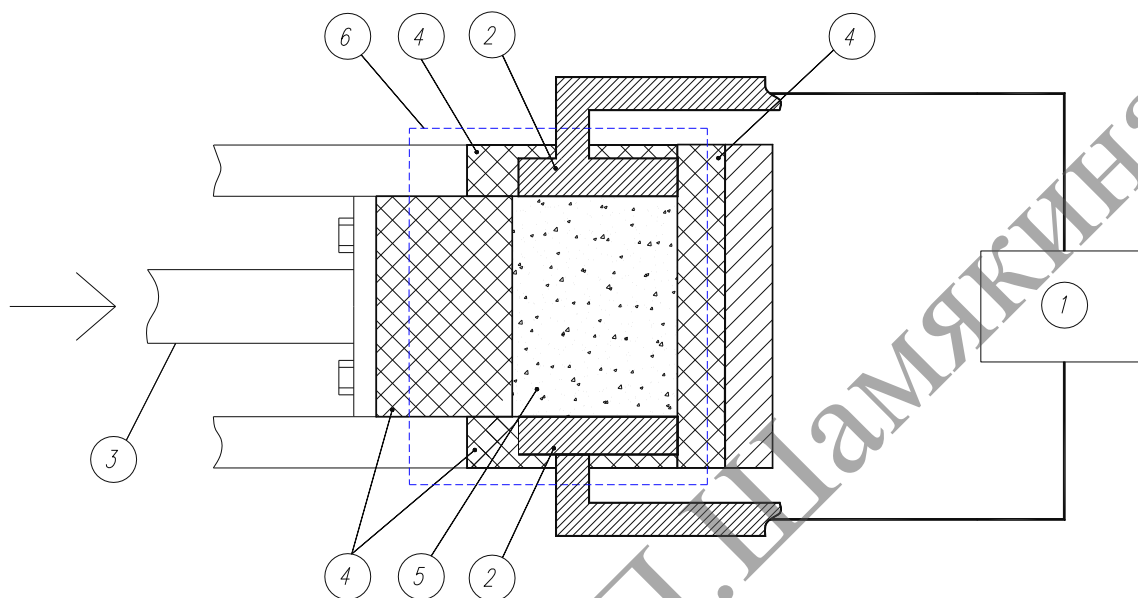
### **8.1. Электропластическое компактирование (брикетирование) дисперсных электропроводящих сред**

Переработка легковесных отходов металла: металлической стружки, тросов, проволоки, фольги; измельченного металлолома (значительные количества которого могут образоваться при измельчении сложного лома: старых автомобилей, приборов, бытовой техники) – проблема, связанная с их низкой насыпной плотностью и отсутствием эффективной технологии перегрузки при транспортировке и загрузке технологических агрегатов [10, 11]. Брикет-прессы используют большие усилия прессования ( $3\text{--}4 \text{ т/см}^2$ ), и позволяют брикетировать относительно мягкие материалы, например нелегированные низкоуглеродистые стали. В России такое оборудование не производится.

Электропластический (электроимпульсный) метод компактирования металлических отходов [12–15] состоит в том (рисунок 1), что измельчённые отходы прессуют при сравнительно небольших давлениях, до  $0,5 \text{ т/см}^2$  для стружки высокопрочных сплавов и пористости брикетов порядка 50 %, и подвергают обработке с использованием коротких импульсов электрического тока. Эта обработка позволяет связать спрессованную стружку в прочный брикет. Для формирования брикета используется локальное и кратковременное воздействие на исходное сырьё потока энергии большой плотности, а именно короткий импульс электрического тока большой плотности. Весь металл при брикетировании нагревается незначительно, а локальные зоны контактов на короткое время, это позволяет избежать окисления металла даже при брикетировании на воздухе такого химически активного металла, как титан. Локальность воздействия обеспечивается самим способом воздействия, а прочность материала формируется за счёт импульсной электрической сварки контактов между частицами металла.

Метод может быть реализован двумя способами. В первом прессование и пропускание электрического тока осуществляются в одном направлении. В другом, более технологичном способе, который показан на рисунке 1, прессование осуществляется в одном направлении, вдоль наиболее короткой стороны формируемого брикета, что позволяет уменьшить ход плунжера прессы и габариты установки; а электрический ток пропускается

в перпендикулярном направлении, вдоль длинной стороны брикета, что позволяет сделать электроды неподвижными и увеличить электрическое сопротивление брикетируемой стружки [11]. Ниже показано, что при одинаковых параметрах обработки оба метода обеспечивают одинаковую прочность брикетов. Первый метод использовался для экспериментальных работ, а второй для технологических установок.



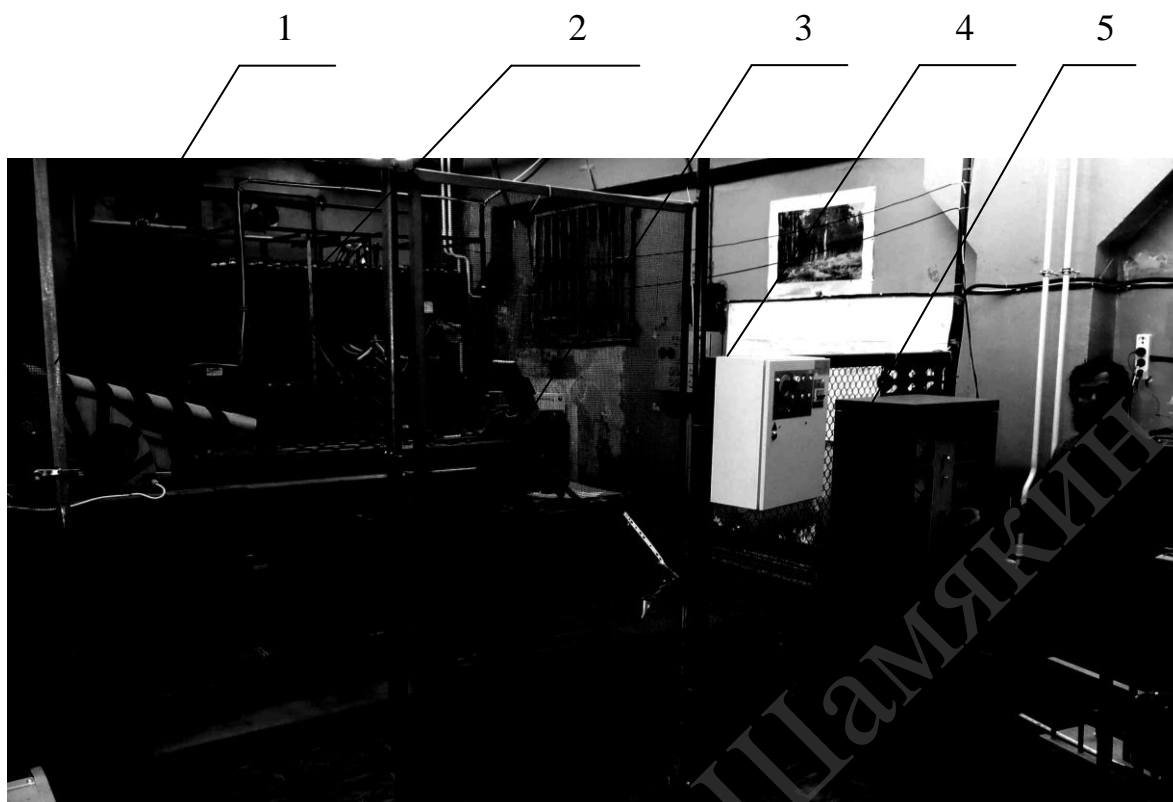
- 1 – источник импульсного электрического тока;  
 2 – электроды; 3 – пресс; 4 – изоляторы; 5 – стружка;  
 6 – электроизолированная пресс-форма

**Рисунок 1. – Схема установки для электропластического брикетирования металлических отходов**

Разработана модель процесса брикетирования [14, 15], которая позволяет оценить прочность брикетов. Проведена оценка энергозатрат на брикетирование стружки различными способами и утилизацию стружки в целом [15]. Удельная энергия, необходимая для сварки брикета  $20 \text{ кДж/кг}$ , для холодного прессования  $36 \text{ кДж/кг}$ , для разогрева стружки до температуры, при которой происходит существенное увеличение пластичности и снижение усилия прессования  $418 \text{ кДж/кг}$ , энергия, необходимая для плавки титана  $1150 \text{ кДж/кг}$ .

Разработана модельная установка для брикетирования (рисунок 2) – прообраз промышленной установки. Она состоит из генератора импульсного тока (ГИТ, запасаемая энергия  $200 \text{ кДж}$ ), кривошипно-шатунного пресса и диагностической аппаратуры [11, 16]. На рисунке 3 представлена фотография пробного брикета полученного на установке.





1 – пресс; 2 – конденсаторная батарея; 3 – прессовальная камера;  
 4 – пульт управления прессом; 5 – пульт управления конденсаторной батареей  
 Рисунок 2. – Модельный образец установки для брикетирования металлической стружки

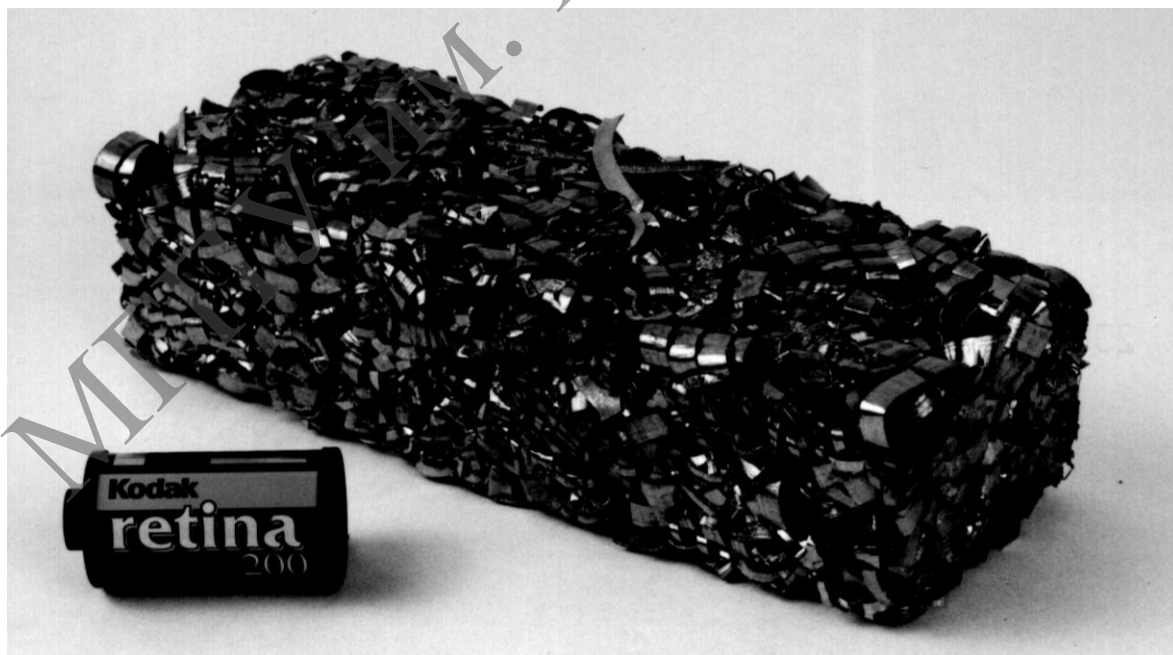


Рисунок 3. – Фотография пробного брикета. Стружка титанового сплава 3М. Размер брикета: 175x64x50 мм; плотность 1,1 г/см<sup>3</sup> (пористость 75%); масса 590 г. Прессование осуществляется вдоль короткой стороны брикета, а ток пропускается вдоль длинной его стороны



На лабораторной, опытно-промышленной и модельной установках изготовлены брикеты различной формы, размера и плотности из отходов разного вида и качества: стружки чугуна и сталей, магнитных и немагнитных, (Сталь 3, Сталь 45, нержавеющая сталь 12X18Н10Т), из измельченного стального лома и металлокорда автомобильных шин [16]; стружки титановых сплавов различных сортов, в том числе высокопрочных, (BT1-0, 3М, BT20, Ti-10V-2Fe-3Al) [15, 17], алюминия, меди, латуни. Изготавливались в т. ч. брикеты из окисленных, замасленных и окрашенных материалов; с электропроводящими и диэлектрическими крупногабаритными и дисперсными включениями. Фотографии некоторых наиболее характерных образцов брикетов приведены на рисунках 4–10.

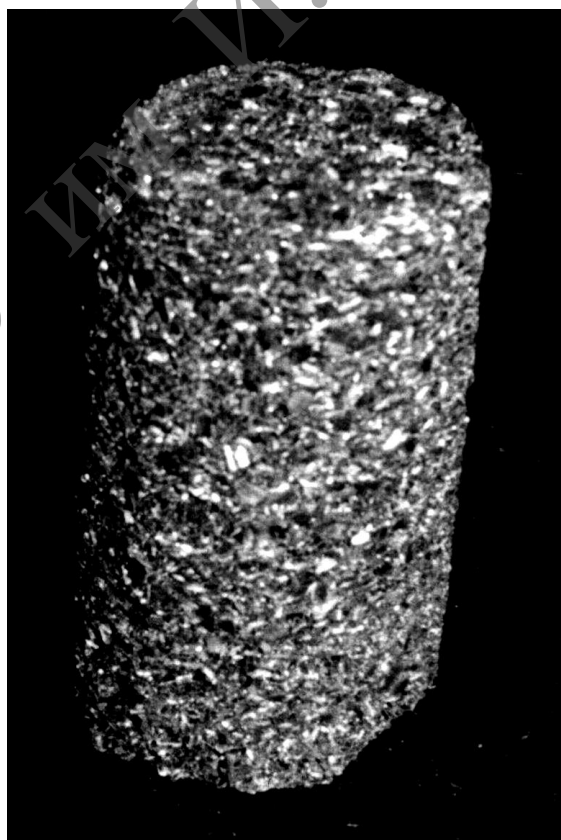


**Рисунок 4. – Фотография длиномерного брикета из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: диаметр 53 мм; высота 210 мм; плотность 1,1 г/см<sup>3</sup> (пористость 75 %); масса 520 г**

Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль длинной стороны брикета.



**Рисунок 5. – Фотография брикета из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: 70x70x30 мм; плотность 1,3 г/см<sup>3</sup> (пористость 70 %); масса 200 г. Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль короткой стороны брикета**



**Рисунок 6. – Фотография брикета из чугуновой стружки. Размер: диаметр 53 мм,**

высота 90 мм; плотность 2,8 г/см<sup>3</sup> (пористость 60 %); масса 500 г. Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль длинной стороны брикета

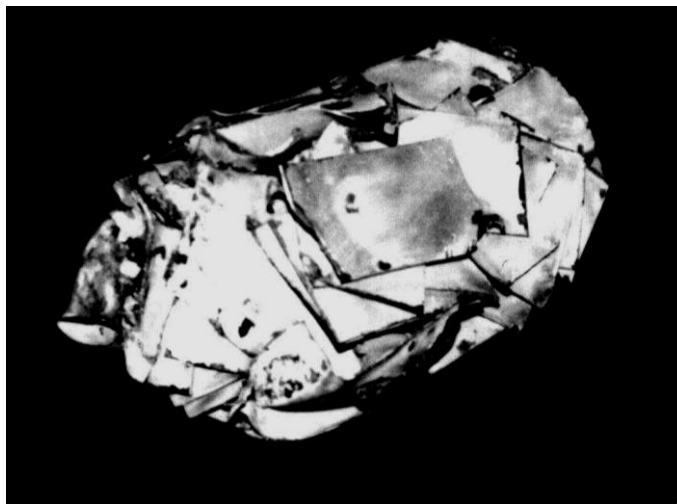
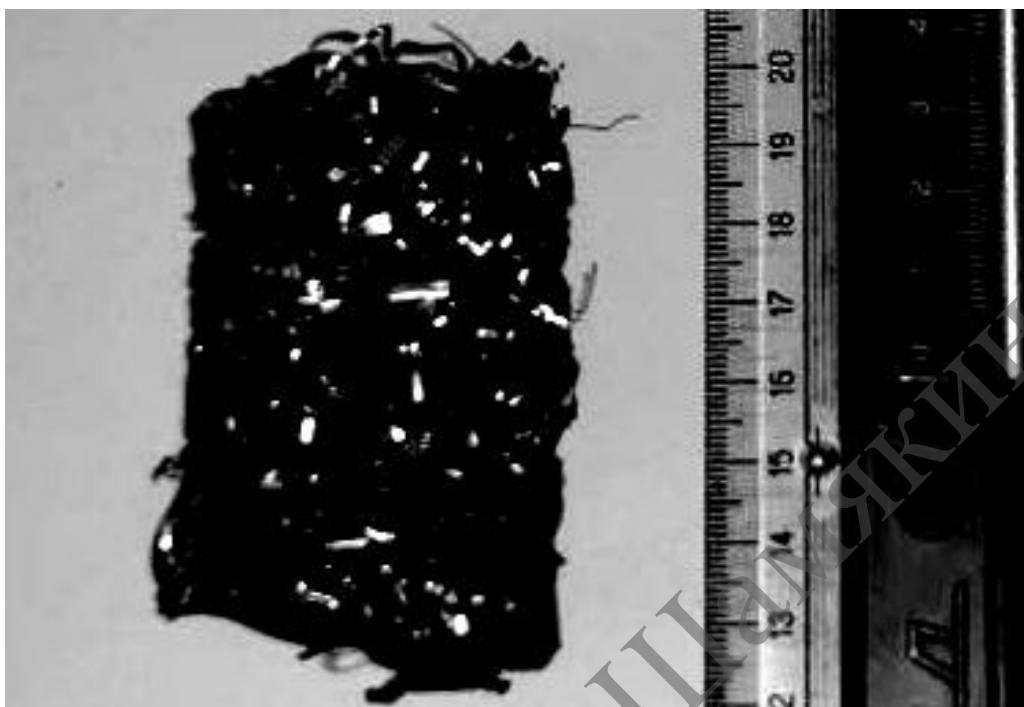


Рисунок 7. – Фотография брикета из стального измельченного окрашенного лома электроосветительной арматуры, куски 1х20х30 мм. Размер: диаметр 53 мм, высота 100 мм; плотность 2,1 г/см<sup>3</sup> (пористость 70 %); масса 465 г. Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль длинной стороны брикета

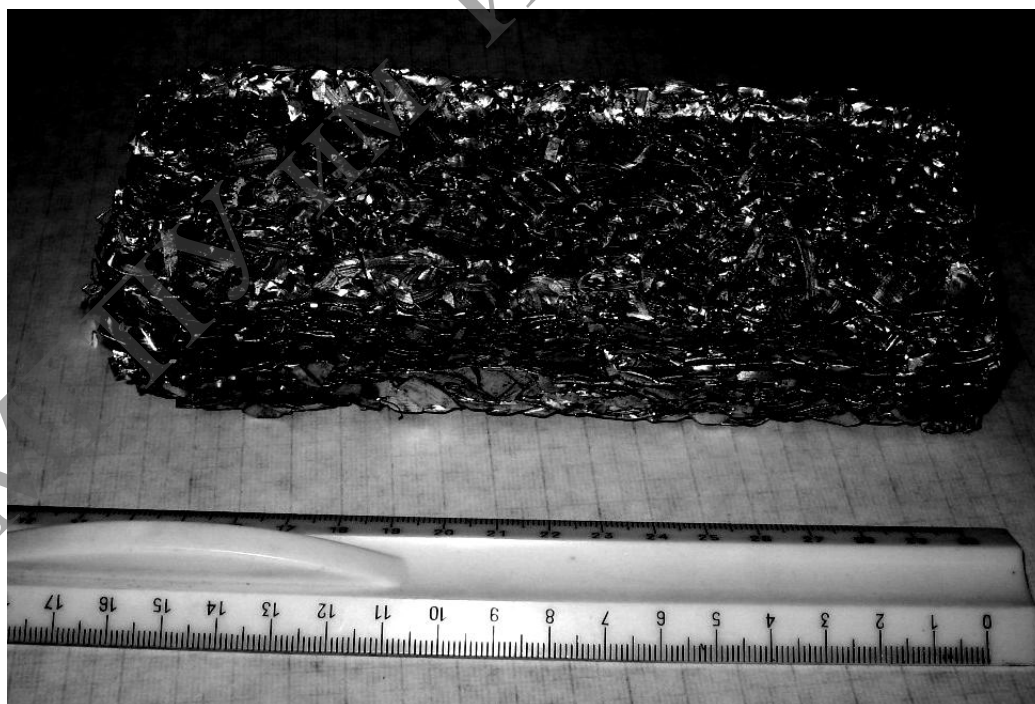


Рисунок 8. – Брикет из стружки нержавеющей (высоколегированной) стали

**2X18H10T. Размер: диаметр 53 мм, высота 100 мм; плотность 1,5 г/см<sup>3</sup> (пористость 80 %); масса 340 г. Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль длинной стороны брикета**



**Рисунок 9. – Брикет из стружки меди (M0) Размер: диаметр 42 мм, высота 62 мм; плотность 1,4 г/см<sup>3</sup> (пористость 80 %); масса 120 г. Прессование и пропускание электрического тока осуществляются вдоль длинной стороны брикета**



**Рисунок 10. – Фотография брикета из стружки алюминиевого сплава. Размер брикета: 175x66x28 мм; плотность 1,0 г/см<sup>3</sup> (пористость 60%); масса 340 г.**

Прессование осуществляется вдоль короткой стороны брикета, а ток пропускается вдоль длинной его стороны

## 8.2. Исследование прочностных характеристик брикетов

Использовалась стружка титанового сплава 3М. Исследовались 4 группы образцов. Группы отличались по плотности, до которой сжимался исходный материал. Первая группа "12" имела плотность  $0,5 \text{ г/см}^3$  (12 % Ti, остальное воздух), которая близка к насыпной плотности стружки, следующие группы: "16"— $0,75 \text{ г/см}^3$  (16% Ti), "18"— $0,8 \text{ г/см}^3$  (18 % Ti), "25"— $1,1 \text{ г/см}^3$  (25% Ti). Получали образцы следующих размеров: диаметр 53 мм, высота 100–140 мм. Величина пропускаемого через образец тока регулировалась путём изменения зарядного напряжения конденсаторной батареи  $U_0$ . Эксперименты осуществлены при разном зарядном напряжении батареи: 250, 300, 500, 1000, 1500, 4000 В. В каждом опыте регистрировались: осциллограммы тока и напряжения на образце, электрическое сопротивление образца до и после пропускания электрического тока, температура образца после пропускания тока; затем образцы испытывались на разрыв и измерялась максимальная нагрузка при разрыве. Исследование прочности образцов осуществлялось при их испытании на разрыв при одноосевом статическом нагружении на разрывной машине. Результаты опытов сведены в таблицу 1. Для каждой партии в первой графе таблицы приведены расчетные значения нагрузки при разрыве. В следующих графах приведены: нагрузка при разрыве образцов на разрывной машине и предел прочности.

Из таблицы видно, что процесс формирования механической прочности образцов импульсным электрическим током носит пороговый характер. При малом зарядном напряжении батареи (и соответственно при малом токе) формирования брикетов не происходит, при большем напряжении образуются брикеты с малой прочностью, при дальнейшем увеличении напряжения, прочность брикетов резко возрастает и затем в широком диапазоне изменения величины пропускаемого тока растёт медленно. Лучший образец из числа тех, которые мы смогли разрушить по нашей методике, имел прочность на разрыв  $\sim 500 \text{ кПа}$ , более прочные образцы выскальзывали из захватов разрывной машины.

В дальнейшем аналогичное исследование выполнено для стружки чёрных металлов. Получали и исследовали серии брикетов из стружки Сталь 3, Сталь 45, нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Результаты сведены в таблицу 2 [16].

Неожиданным оказалось то, что при относительно небольшом вкладе энергии ( $\sim 5 \text{ кВт час/т}$ ) прочность брикетов на разрыв превысила  $200 \text{ кН/м}^2$ , что вполне достаточно для транспортировки и переработки, а также

позволяет использовать брикеты в качестве материалов и изделий.

Исследовались прочностные характеристики брикетов, получаемым промышленным методом, т. е. при пропускании тока перпендикулярно направлению прессования. Использовалась та же стружка сплава 3М. Получали брикеты размером 60x60x200 мм. Брикеты исследовались на излом, и определялся предел прочности, который принимает значение:  $\sigma_{\perp} = 0,274 \pm 0,121$  (Н/мм<sup>2</sup>) – для случая, когда разламывающее усилие создавалось перпендикулярно направлению сжатия стружки; и  $\sigma_{\parallel} = 0,216 \pm 0,08$  (Н/мм<sup>2</sup>) – для случая, когда разламывающее усилие создавалось вдоль направления сжатия стружки. Полученные значения в пределах ошибки измерений равны, прочность брикетов на излом существенно не зависит от направления их нагружения, соответственно можно ввести  $\sigma = 0,245 \pm 0,1$  МПа по результатам обеих серий испытаний. При аналогичных энергетических параметрах обработки, брикеты, получаемые по экспериментальной схеме, обладают пределом прочности на разрыв (направление нагружения совпадает как с направлением прессования, так и с направлением пропускания тока)  $\sigma = 0,19$  МПа, что также лежит в пределах ошибок. Хотя в материале имеются выделенные направления (направление прессования и направление пропускания тока, которые могут совпадать или быть взаимно перпендикулярны), его прочностные характеристики изотропны [17].

Таблица 1. – Результаты испытаний образцов из стружки титанового сплава 3М на разрыв при статическом одноосевом нагружении

$U_6$ , $B$	$E$ , $кДж$	Группа 12 ( $\gamma_c = 0,5 \text{ г/см}^3$ , $W = 170 \text{ г}$ , $P = 700 \text{ кПа}$ )			Группа 16 ( $\gamma_c = 0,75 \text{ г/см}^3$ , $W = 200 \text{ г}$ , $P = 1400 \text{ кПа}$ )			Группа 18 ( $\gamma_c = 0,8 \text{ г/см}^3$ , $W = 250 \text{ г}$ , $P = 1800 \text{ кПа}$ )			Группа 25 ( $\gamma_c = 1,1 \text{ г/см}^3$ , $W = 250 \text{ г}$ , $P = 6000 \text{ кПа}$ )		
		Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов			Нагрузка при разрыве образцов		
		Расчет $H$	Опыт		Расчет, $H$	Опыт		Расчет, $H$	Опыт		Расчет, $H$	Опыт	
			$H$	$кПа$		$H$	$кПа$		$H$	$кПа$		$H$	$кПа$
250	0,48	-140	*										
300	0,68	-5	**										
500	1,9	110	35	16	-88	*		-1260	*				
1000	7,5	400	30	14	1290	<b>170</b>	77	-750	15	7	-710	**	
1500	17		<b>190</b>	86	1480	350	160	550	<b>420</b>	190	-134	5	2
2000	30	410	180	82	2010	450	200	2030	540	240	5200	<b>360</b>	160
2500	47	1500	310	140				3890	>1140	>510	8100	940	430
3000	68	1250	110	50	1520	>450	>200						
3500	92	1370	>260	>120									
4000	120	6	**										

$U_6$  – напряжение батареи,  $E$  – запасённая энергия,  $\gamma_c$  – плотность сжатой стружки,  $P$  – давление прессования,  $W$  – масса брикета

\* – прочный образец не сформирован (извлекается стружка)

\*\* – образец сформирован не по всему объёму (извлекаются куски и стружка)

Таблица 2. – Результаты испытаний на разрыв при статическом одноосевом нагружении брикетов из стружки сталей

$U_0, B$	$E, кДж$	Нагрузка при разрыве образцов / предел прочности				
		Сталь 3		Сталь 45	Нержавеющая сталь 12X18H10T	
		$\gamma_c = 1.13 г/см^3$	$\gamma_c = 1.26 г/см^3$	$\gamma_c = 1.26 г/см^3$	$\gamma_c = 2.12 г/см^3$	$\gamma_c = 2.83 г/см^3$
500	1,9	5 Н/2,27 кПа	5 Н/2,27 кПа	-	5 Н/2,27 кПа	15 Н/6,82 кПа
1000	7,5	15 Н/6,82 кПа	10 Н/4,5 кПа	5 Н/2,27 кПа	35 Н/15,9 кПа	<b>100 Н/45,5 кПа</b>
1500	17	<b>15 Н/6,82 кПа</b>	–	15 Н/6,82 кПа	<b>&gt;250 Н/113,6 кПа</b>	<b>&gt;25 Н/113,6 кПа</b>
2000	30	<b>100 Н/45,5 кПа</b>	<b>105 Н/47,7 кПа</b>	–		
2500	47	<b>&gt;250 Н/113,6 кПа</b>	<b>&gt;250 Н/113,6 кПа</b>	<b>&gt;200 Н/90,9 кПа</b>	–	–



### 8.3. Измерение электрического сопротивления и температуры образцов

Эти измерения показывают, что конечное сопротивление образца существенно (в 2 раза) меньше начального как для брикетов, так и для образцов, которые рассыпаются после снятия давления (сопротивление измерялось перед извлечением образца). Зависимости конечного сопротивления от величины зарядного напряжения батареи и амплитуды импульса тока не наблюдается.

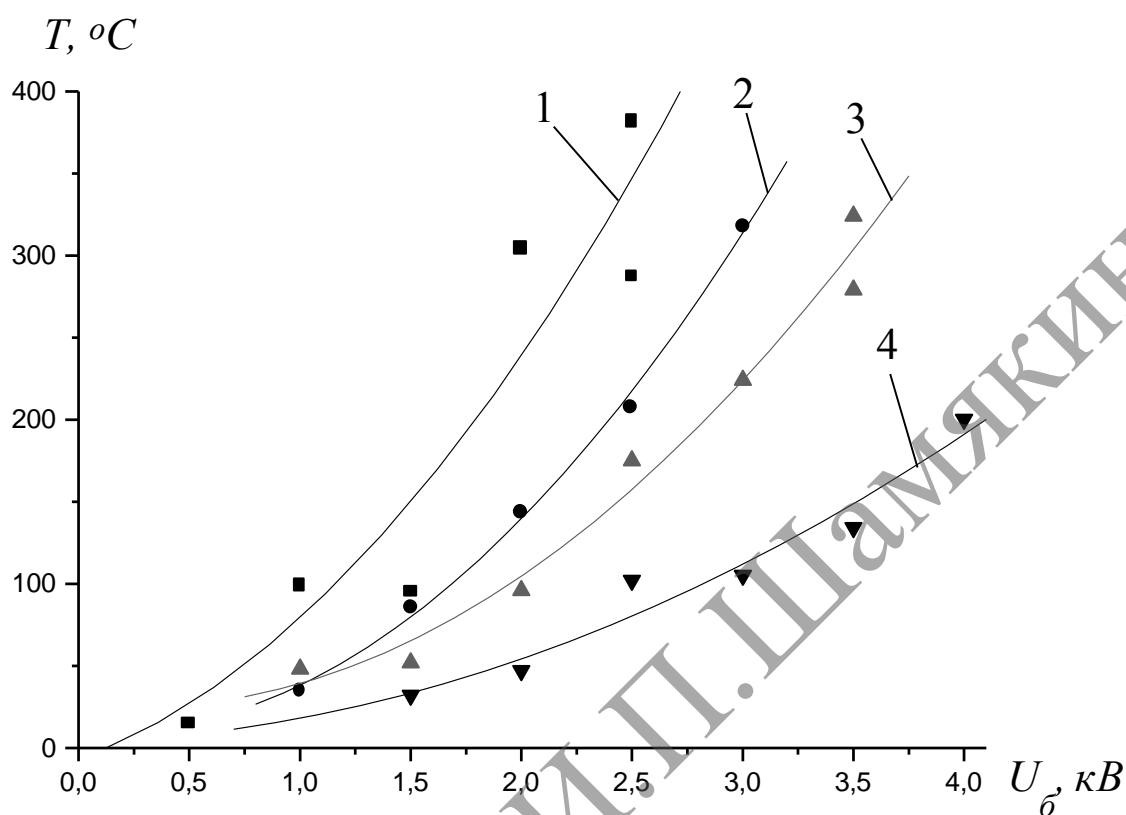
Результаты измерения усредненной по объёму температуры образцов представлены на рисунке 11. Температура измерялась термопарой через 2 минуты после пропуска тока, а затем экстраполировалась к моменту окончания импульса тока. Из графиков видно, что в описываемых опытах образцы малой плотности нагреваются не более чем на  $400^{\circ}$ , а более плотные не более чем на  $200^{\circ}$ . Это согласуется с величиной энергии, вложенной в нагрузку, которая рассчитывалась по осциллограммам тока, а также с внешним видом образцов. Эти данные согласуются также с результатами работ, в которых выполнен химический анализ металла брикетов.

Если считать, что основная часть энергии выделяющейся в образце при протекании тока переходит в тепло, то сопоставление результатов, приведённых в таблице 1 и на рисунке 11, показывает что энергозатраты, необходимые для получения прочных брикетов составляют для брикетов малой плотности ( $0,5 \text{ г/см}^3$ )  $\approx 50 \text{ кДж/кг}$ , а для брикетов большой плотности ( $1,1 \text{ г/см}^3$ )  $\approx 10 \text{ кДж/кг}$ . Расчётная оценка этой величины составляет  $\approx 20 \text{ кДж/кг}$ . С учётом потерь энергии в разрядной цепи эти затраты можно определить как отношение энергии запасённой в батарее к массе полученных брикетов. Тогда для брикетов малой плотности полные энергозатраты составят  $\approx 100 \text{ кДж/кг}$ , а для брикетов большой плотности  $\approx 120 \text{ кДж/кг}$ . Энергозатраты на переплав титана существенно превышают  $1000 \text{ кДж/кг}$ , т. е. энергозатраты на брикетирование составляют пренебрежимо малую часть энергозатрат на утилизацию стружки.

#### Осциллограммы тока и напряжения [14, 15]

На рисунке 12. приведены характерные осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$ . Такой характер осциллограмм наблюдался для всех исследованных образцов как титановых, так и стальных и при всех исходных плотностях сжатой стружки. В первом варианте (а), при относительно малой амплитуде электрического тока, не происходит консолидации (брикетирования) образца, а осциллограмма напряжения повторяет осциллограмму тока. При большей амплитуде тока (б) происходит консолидация, в этом случае формируется плоская вершина импульса напряжения с амплитудой 500 V.

1 ■ – плотность брикетов  $0,5 \text{ г/см}^3$  (12% металла);



2 ● – плотность брикетов  $0,75 \text{ г/см}^3$  (16% металла);

3 ▼ – плотность брикетов  $0,8 \text{ г/см}^3$  (18% металла);

4 ▲ – плотность брикетов  $1,1 \text{ г/см}^3$  (25% металла)

Рисунок 11. – Зависимость температуры брикетов  $T$  от начального напряжения на конденсаторной батарее  $U_0$

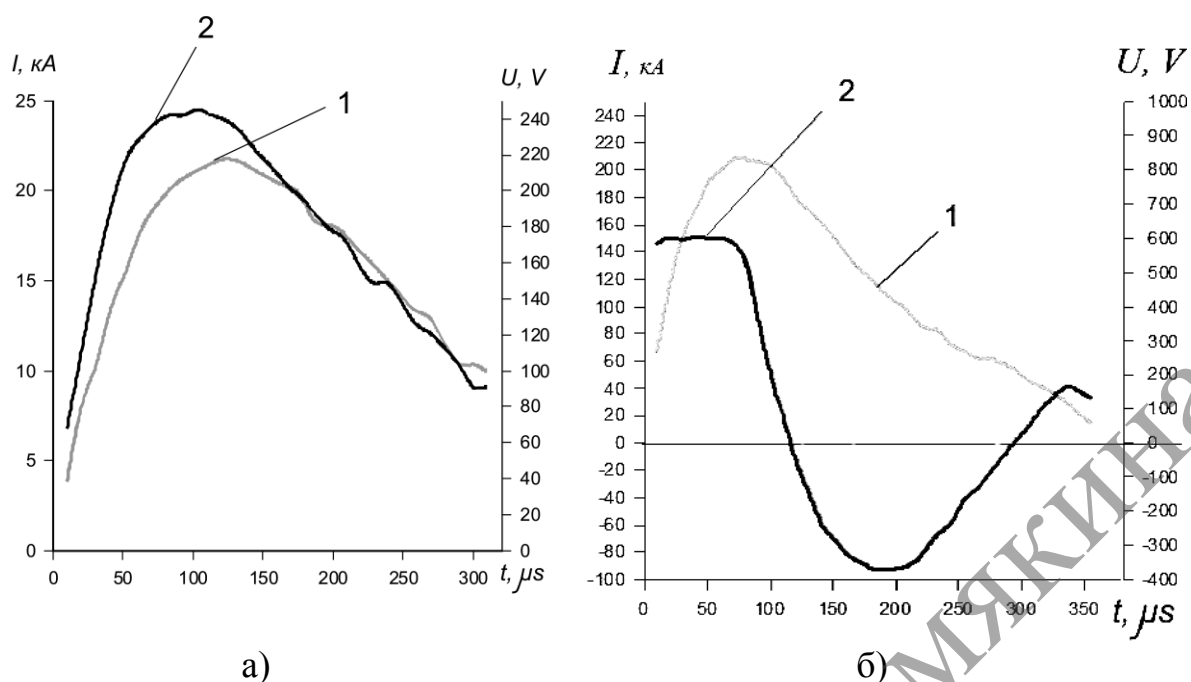


Рисунок 12. – Осциллограммы тока и напряжения на образце

1 — Осциллограмма тока через образец  $I$ .

2 — Осциллограмма напряжения на образце  $U$ .

а) Плотность образца  $0,5 \text{ g/cm}^3$  (12 % металла). Зарядное напряжение батареи  $U_c = 500 \text{ V}$ . Прочность отсутствует, извлекаемая стружка рассыпается.

б) То же, зарядное напряжение батареи  $U_c = 2500 \text{ V}$ . Сформирован прочный брикет, нагрузка при разрыве при одноосевом растяжении  $310 \text{ N}$ .

#### 8.4. Исследование качества металла, выплавляемого из брикетов, изготовленных из стружки титановых сплавов

Для оценки влияния, которое может оказывать процесс брикетирования на качество металла, выплавляемого с использованием в составе шихты брикетов из стружки, а также для оценки возможной сферы применения брикетов в металлургическом производстве проведена специальная серия экспериментов [12]. Использовалась стружка с минимальным окислением и загрязнением, полученная при малых скоростях резания, без использования СОЖ. Изготовлено 12 малоразмерных брикетов диаметром и высотой  $30 \text{ мм}$ , плотностью  $1,6\text{--}2 \text{ g/cm}^3$ , массой  $30\text{--}40 \text{ г}$ . Семь брикетов переплавлено во взвешенном в магнитном поле состоянии в атмосфере гелия высокой чистоты. Получены малогабаритные слитки. Стандартным спектральным методом выполнен химический анализ исходного слитка, стружки, одного из брикетов и конечного слитка.

Результаты анализа, таблица 3, показывают, что ни одна из стадий процесса, и в том числе брикетирование, не приводит к существенному окислению и загрязнению металла.

Три из выплавленных малогабаритных слитков подвергнуты более детальному исследованию. Оно включало химический анализ содержания основных газообразующих элементов, которые могут загрязнять металл (*O*, *N*, *C*), результаты в таблице 3, и механические испытания, результаты которых приведены в таблице 4. Все образцы по содержанию углерода и азота удовлетворяют требованиям Стандартов, а по содержанию кислорода удовлетворяют или близки к требованиям Стандартов. Механические свойства образцов удовлетворяют требованиям Стандартов или соответствуют справочным величинам для близких по составу сплавов по тем характеристикам, которые не регламентируются Стандартами.

Для оценки технологических возможностей использования брикетов в промышленных условиях изготовлено (на лабораторной установке) 20 кг брикетов. Стружка (500 кг) получена в мелкосерийном опытном производстве и содержит титановый сплав 3М. Изготовлены брикеты с плотностью:  $1-1,5 \text{ г/см}^3$ , размером: диаметр 40–75 мм, высота 100–120 мм, масса: 200–600 г. Из полученных брикетов и кусковых отходов методом пролива [18] изготовлены расходоуемые электроды, из которых выплавлены слитки массой около 100 кг (доля использования брикетов из стружки в шихте составляла 5 и 10 %). Исследование характеристик выплавленного слитка показало, что его качество соответствует предварительным расчетам. При увеличении доли брикетов в составе шихты на 1 % содержание кислорода в сплаве увеличилось на 0,008 %.

Для сравнения приведены требования Стандартов для близких по составу сплавов.

Таблица 3. – Результаты химического анализа исходного металла, стружки, брикета и выплавленных слитков

Наименование проб	Содержание в %							
	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Zr</i>	<i>O</i>	<i>N</i>
Исходный металл*	основа	2,8	<0,05	<0,1	0,01	<0,01	0,09	0,010
Стружка**	основа						0,08	0,017
Спрессованная стружка (брикет)*	основа		<0,1	<0,1	0,01	<0,04	0,11	0,020
Слиток № 1*	основа	2,8	0,10	<0,1	0,03	<0,01	0,14	0,010
Анализ основных примесей***								

Продолжение таблицы 3

Слиток № 2					0,042		0,14 0,12	0,012
Слиток № 3					0,045		0.19	0,012
Слиток № 4					0,034			0,012
Требования ГОСТ 19807-91 Сплав ВТ1-0	основа	–	0,10	0,25	0,07	–	0,20	0,04
Требования ОСТ 5Р.9071- 88 Сплав ТЛЗ	основа	3,0- 4,5	0,12	0,25	0,15	–	0,15	0,04

\* Сумма прочих примесей не более 0,3%; Анализ выполнен в соответствии с ГОСТ 23902-79, ГОСТ 19863-1-91, ГОСТ 28052-89, ГОСТ 9853.1-79.

\*\* Анализ выполнен в соответствии с ГОСТ 18052-89, ГОСТ 9853-1-79.

\*\*\* Анализ выполнен методом восстановительного плавления в атмосфере газа носителя.

Для сравнения приведены требования Стандартов и справочные данные для близких по составу сплавов.

Таблица 4. – Результаты механических испытаний материала малогабаритных слитков, выплавленных из брикетов полученных по МГД технологии

№	Прочность на разрыв $\sigma_b$ МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа	Относитель- ное удлинение $\delta_5$ %	Относитель- ное сужение $\psi$ %	Твердость по Роквеллу $R_b$ $10^7$ н/м <sup>2</sup>
Результаты испытаний					
2	624	588	16,0	43,4	100
3	624	606	21,3	44,9	92
4	735	666	17,0	40,5	91
Требования ОСТ 5Р.9071-88 для сплава ТЛЗ (3,0–4,5% алюминия) (не менее)				для ВТ1-0, ВТ-5	для титана
	490	440	10	60, 25-40	102,8

Таким образом, результаты всего комплекса испытаний показывают, что при соблюдении технологии резания, брикетирования и переплава,

загрязнение металла при использовании брикетов из стружки может быть ограничено до приемлемой величины.

На практике при металлургической переработке стружки, образующейся на промышленных предприятиях, качество выплавляемого металла будет определяться качеством стружки и может регулироваться путем изменения доли брикетов в составе шихты. По мере увеличения производства брикетов, освоения технологии плавки и подготовки брикетов к плавке доля вовлечения брикетов будет возрастать.

Доля использования брикетов в шихте (по массе) определяется следующим выражением:

$$\beta = \frac{m_{\text{б}}}{m_{\text{б}} + m_{\text{к}} + m_{\text{жс}}} \times 100\% = \frac{k_{\text{б}} v_{\text{б}} \rho_{\text{с}}}{k_{\text{б}} v_{\text{б}} \rho_{\text{с}} + k_{\text{к}} v_{\text{к}} \rho_{\text{м}} + k_{\text{жс}} k_{\text{к}} \rho_{\text{м}}} \times 100\%$$

где  $m_{\text{б}}$ ,  $m_{\text{к}}$ ,  $m_{\text{жс}}$  – масса брикетов, кусковых отходов и заливаемого жидкого металла соответственно;  $k_{\text{б}}$ ,  $k_{\text{к}}$  – коэффициент заполнения объёма изложницы брикетами и кусковыми отходами;  $v_{\text{б}}$ ,  $v_{\text{к}}$  – часть объёма изложницы, заполненная брикетами и кусковыми отходами;  $k_{\text{жс}}$  – доля жидкого металла по отношению к массе кусковых отходов. Полагаем  $k_{\text{б}} \approx k_{\text{к}}$ , объём, заполненный брикетами нельзя чрезмерно увеличивать, в связи с тем, что в этом случае возможно нежелательное всплытие загрузки,  $v_{\text{б}} \approx v_{\text{к}} \approx 1/2$ , количество жидкого металла для заливки обычно составляет  $\approx 10\%$  от массы загружаемых

в изложницу кусковых отходов [18]. Подставляя эти данные, получаем, что доля использования брикетов в шихте может составлять  $\approx 25\%$ , при этом вес изготавливаемых электродов также уменьшается примерно на  $25\%$ . Результаты опытов позволяют оценить возможную сферу применения технологии в металлургии. При соблюдении технологии резания, брикетирования и переплава, загрязнение металла при использовании брикетов из стружки может быть ограничено до приемлемой величины. Однако современная технология выплавки титановых слитков не допускает локального загрязнения металла, в особенности образования нитридов. В зоне точек сварки такое локальное окисление и образование нитридов может наблюдаться. В связи с этим выполнено исследование точек сварки.

## **8.5. Газонасыщение точек сварки при брикетировании титановых сплавов электропластическим методом**

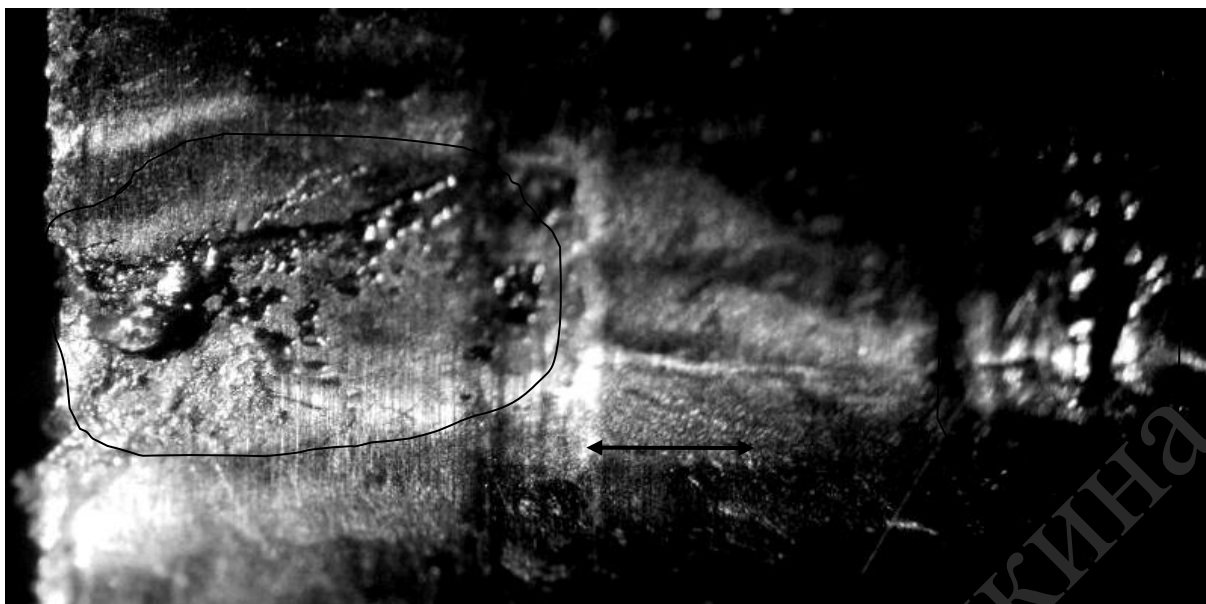
Особый интерес представляет титановая стружка, которую наиболее выгодно использовать при получении слитков и полуфабрикатов, однако это и наиболее сложная задача. Количество стружки, используемой для этой

цели, ограничивается не только её химическим составом, но и недопустимым снижением прочности прессованного расходуемого электрода [19]. Увеличить количество вводимой в электрод стружки можно, вводя её в виде брикетов, но существующая технология брикетирования давлением требует (особенно для высокопрочной титановой стружки) больших усилий прессования (до  $9 \text{ т/см}^2$ ), а брикетирование с нагревом требует использования защитной атмосферы и не позволяет в полной мере исключить насыщение металла кислородом и азотом.

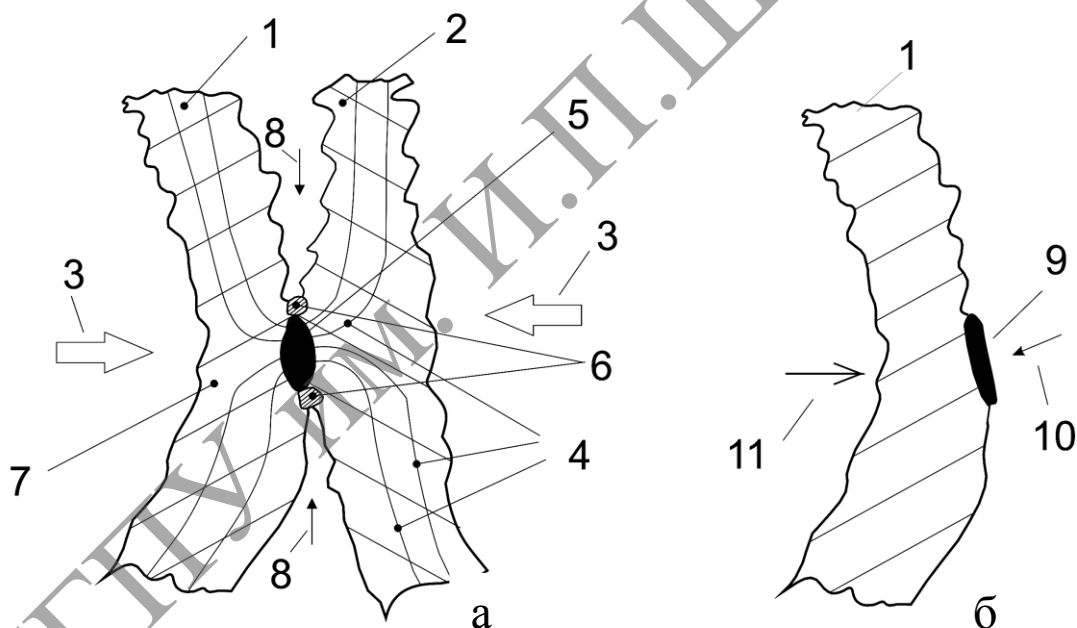
Брикеты, полученные по электропластической технологии, можно использовать в качестве шихты в гарнисажных печах для получения фасонного литья и слитков первого перепада, в соответствии с химическим составом стружки, так же как и другие отходы. Однако, поскольку гарнисажная плавка требует больших затрат энергии и более сложного оборудования, целесообразно вводить брикеты в состав прессованных расходуемых электродов для первого перепада в ВДП. Для решения этой задачи необходимо убедиться в том, что в точках сварки не происходит существенного локального газонасыщения металла кислородом и азотом.

Исследовались брикеты из стружки сплава 3М, полученные на модельной установке (рис. 2.), и пробные малоразмерные брикеты сплава Ti-10V-2Fe-3Al, полученные с помощью экспериментального модуля, на котором прессование осуществлялось ручным прессом. Экспериментальный модуль использован в связи с тем, что модельная установка, имела недостаточное усилие для сжатия высокопрочной титановой стружки. Брикеты разрушались и с периферии (области вблизи электродов), и из центральной части брикетов отбирались места контактов, образующиеся в результате сварки фрагментов частиц стружки под действием импульсов электрического тока большой плотности. Контакты разрывались, и изучалась зона контакта. Характерный внешний вид зоны контактов представлен на фотографии рисунка 13, а на рисунке 14 – условная схема места контакта. На фотографии отчётливо видны следы плавления в виде кратера и выброшенные капли металла. На металле нет видимых следов окисления. Средний размер контактов (кратеров)  $960 \pm 80 \text{ мкм}$  на  $490 \pm 90 \text{ мкм}$ .

Исследовалось содержание газовых примесей на поверхности металла, в зоне контакта, с лицевой (рисунок 4, поз. 10) и обратной (11) стороны фрагмента стружки. Исследование содержания газовых примесей в зоне контактов проводили методом ядерных реакций в институте физики металлов, г. Екатеринбург. Результаты ядерного микроанализа представлены в виде графиков на рисунках 15–18.



**Рисунок 13. – Характерный внешний вид контактов.**  
 Линиями выделены зоны контактов, стрелкой обозначен отрезок 1 мм



**1, 2 – свариваемые фрагменты стружки; 3 – направление действия силы сжатия контакта; 4 – линии электрического тока; 5 – зона, нагреваемая в процессе прохождения импульса тока; 6 – вал окисла, окружающий зону сварки; 7 – зона, нагреваемая до высоких температур после прохождения импульса тока за счёт теплопроводности; 8 – канал поступления атмосферного воздуха; 9 – видимое место контакта; 10 – место измерения газонасыщения – лицевая сторона; 11 – место измерения газонасыщения – обратная сторона**

**Рисунок 14. – Условная схема места контакта (зоны электрической сварки: а) в момент сварки, б) после разрушения контакта**



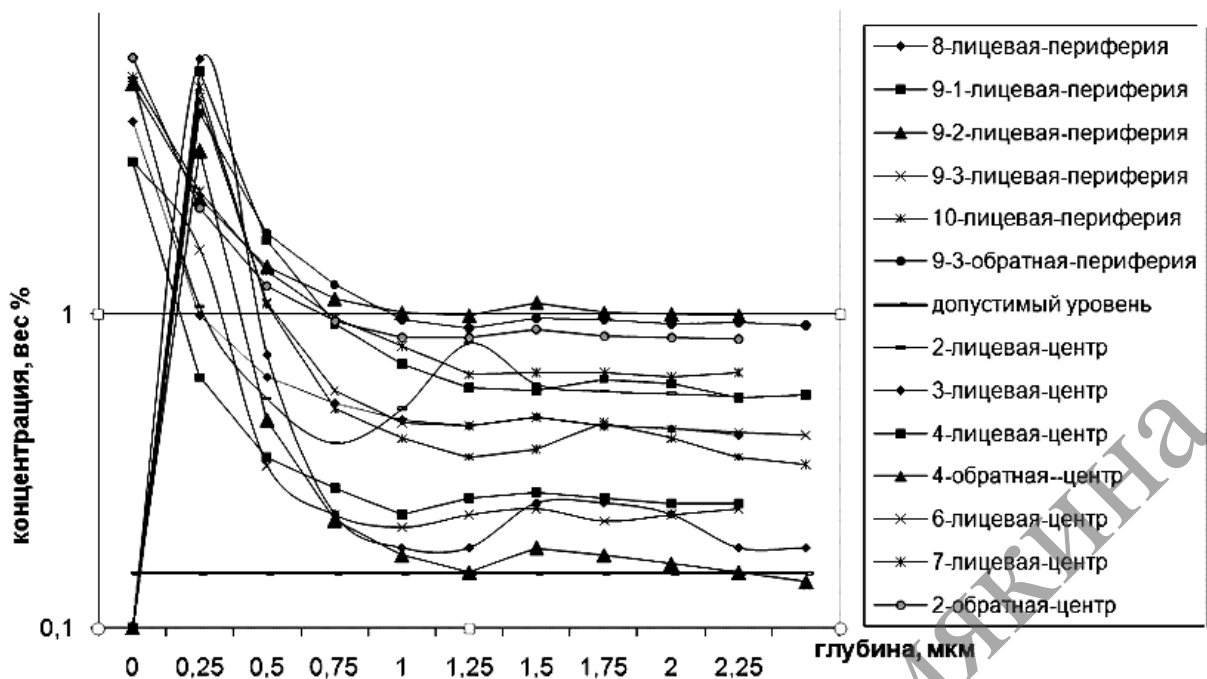


Рисунок 15. – Содержание кислорода в металле в зоне точек сварки, сплав 3М (цифрами указан номер образца)

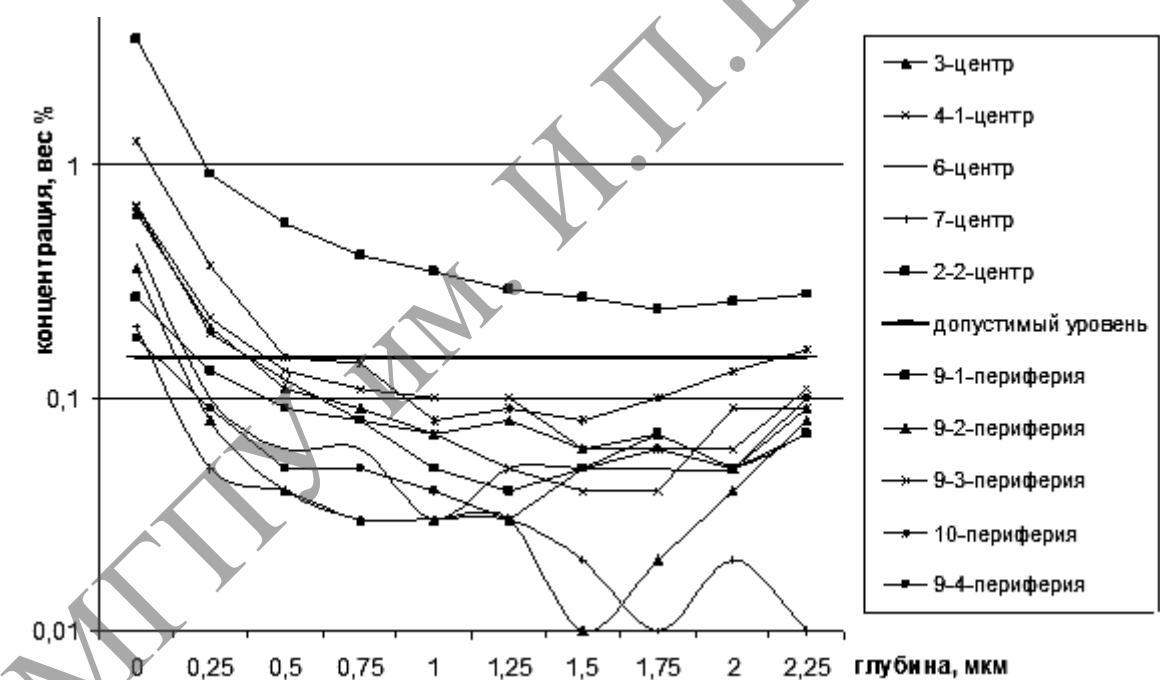
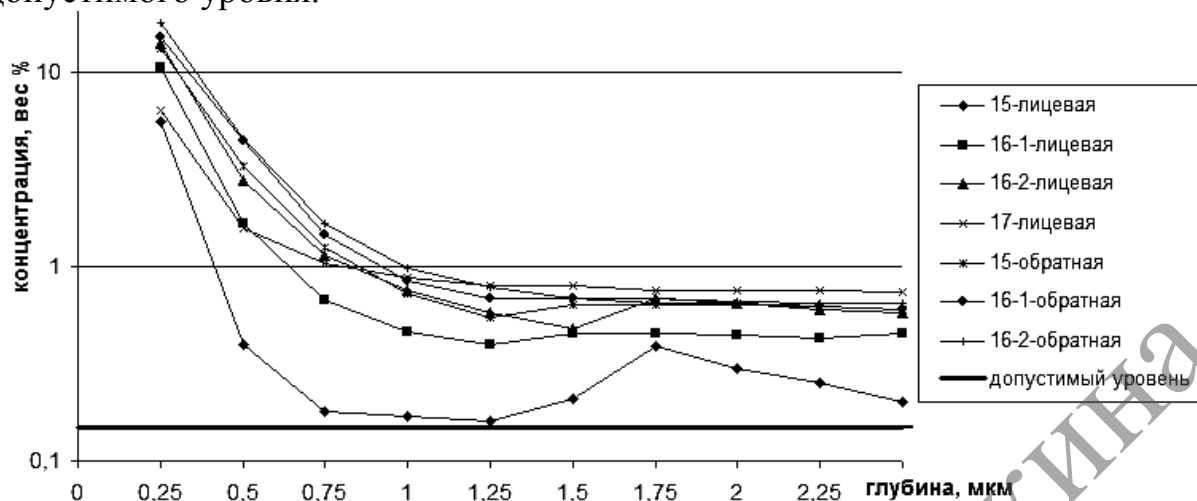


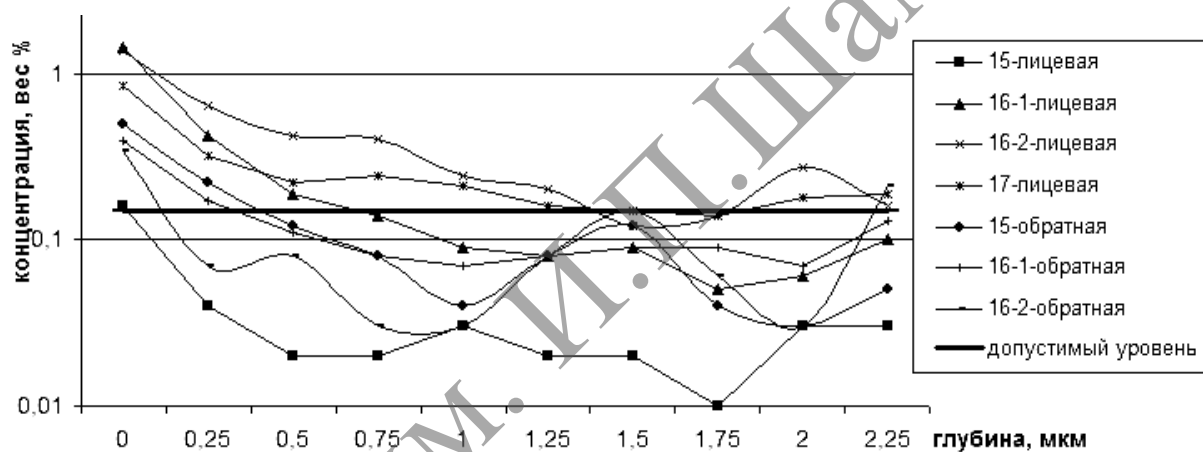
Рисунок 16. – Содержание азота в металле в зоне точек сварки, сплав 3М (цифрами указан номер образца)

Анализ графиков показывает, что содержание кислорода резко уменьшается с глубиной, до глубины ~ 1 мкм, а затем остаётся практически постоянным. Но и на максимальной глубине измерения 2,25 мкм содержание кислорода существенно превышает допустимый уровень, определённый для объёма образца. Содержание азота также быстро уменьшается с глубиной, но становится меньше допустимого уровня, для всех исследованных контактов,

кроме одного, для которого содержание азота остаётся несколько выше допустимого уровня.



**Рисунок 17. – Содержание кислорода в металле в зоне точек сварки, сплав Ti-10V-2Fe-3Al, контакты с периферии (цифрами указан номер образца)**



**Рисунок 18. – Содержание азота в металле в зоне точек сварки, сплав Ti-10V-2Fe-3Al, контакты с периферии (цифрами указан номер образца)**

На рисунке 19 и 20 приведены усреднённые результаты для прямых (рисунок 4, поз. 10) и обратных (11) точек для центральной области брикета, аналогичные результаты получены и для контактов с периферии. Из графиков видно, что содержание кислорода с обратной стороны контакта (т.е. на тыльной поверхности) для всех исследованных контактов несколько выше, чем на лицевой стороне, т.е. собственно в зоне контакта; в то же время содержание азота выше на лицевой поверхности. Это можно объяснить следующим образом. В работе [20] тонкие (1 мм) медные пластинки облучали импульсами лазера (длительность импульса 1 мсек, у нас длительность импульса тока 0,35 мсек; размер пятна лазера 1 мм), рассчитывали температуру лицевой и тыльной поверхности и термоупругие напряжения, температуру измеряли также экспериментально. Изучалась механолюминесценция тыльной поверхности образца, которая свидетельствует о разрушении поверхности на микроскопическом уровне (в

последующих работах показано, что такое разрушение сопровождается изменением нанорельефа полированных образцов в результате выхода на поверхность подвижных дислокаций).

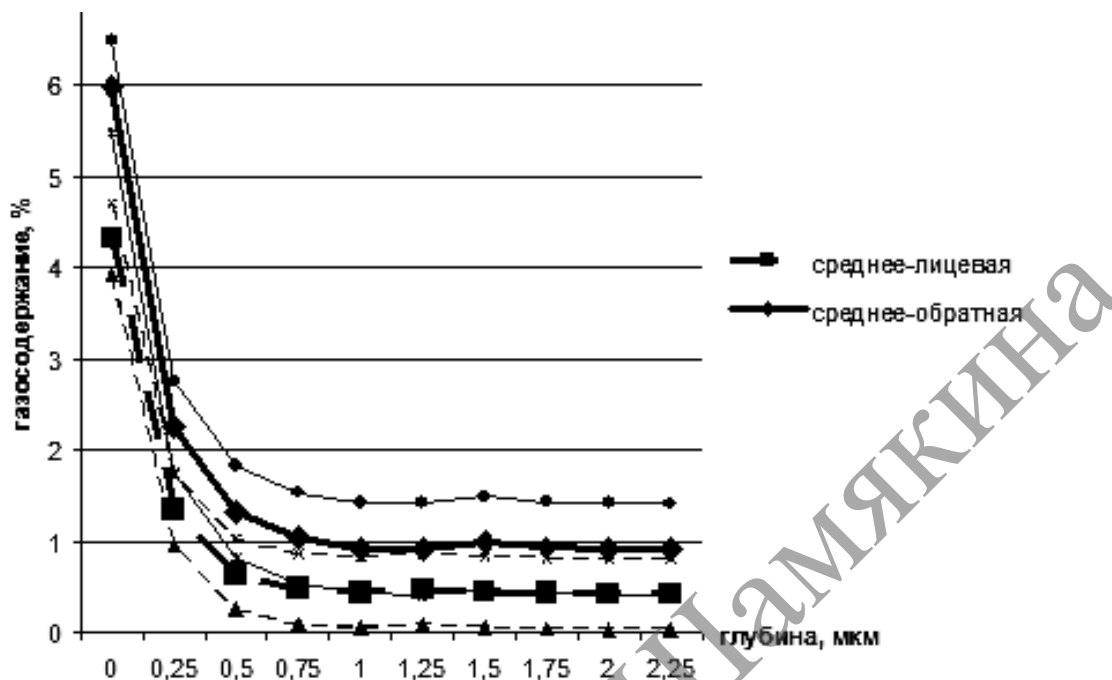


Рисунок 19. – Среднее содержание кислорода в металле с лицевой (10) и обратной (11) стороны в зоне точек сварки

Сплав 3М, контакты из центральной области брикета, тонкими линиями показано среднее квадратичное отклонение.

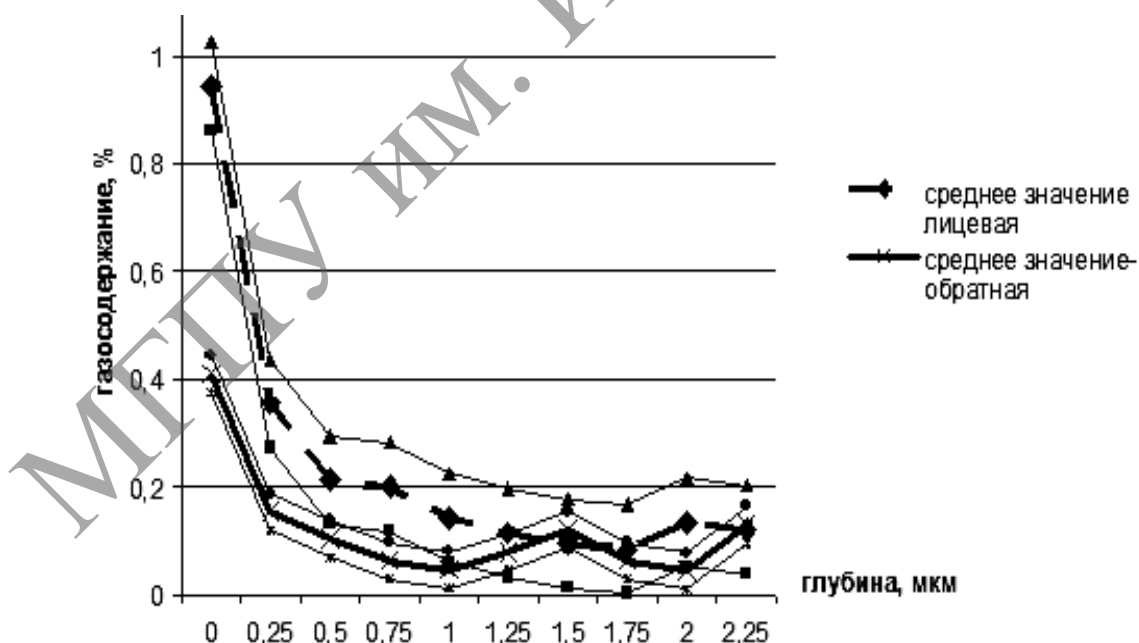


Рисунок 20. – Среднее содержание азота в металле с лицевой (10) и обратной (11) стороны в зоне точек сварки

Сплав Ti-10V-2Fe-3Al, контакты из периферийной области брикета, тонкими линиями показано среднее квадратичное отклонение.

Показано что тыльная поверхность нагревается до вдвое меньшей температуры, чем лицевая поверхность образца, но время нахождения в разогретом состоянии существенно выше. Поскольку длительность импульса лазера больше, чем время пропускания тока, а теплопроводность меди существенно больше, чем у титана, размер нагретой области (рисунок 4. поз. 7) в нашем случае будет меньше, а температура её соответственно выше. Таким образом, с лицевой стороны металл нагревается до большей температуры, но на более короткое время, содержание азота здесь выше, а кислорода меньше. Следует учесть, что зона контакта с лицевой стороны (рисунок 4. поз 5) фактически защищена от доступа атмосферы, поскольку непосредственно вблизи контакта зазор между образующими его металлическими фрагментами (1 и 2) мал (8), а проникновению газа может также препятствовать вал окисла (6) [21] Кроме того, вклад в окисление может вносить и разрушение обратной поверхности в результате воздействия термоупругих напряжений (о котором свидетельствует механолюминесценция).

Строились усреднённые графики для сравнения контактов из центра и с периферии, для содержания кислорода полученные кривые практически во всех точках лежат в области статистического разброса, это означает что статистически значимого различия не выявлено, а содержание азота в контактах с периферии несколько выше.

Сравним полученные результаты исследования с имеющимися данными других авторов. В работе [19] приведены данные о содержании кислорода и толщине газонасыщенного слоя на поверхности отходов различных титановых сплавов. Для близкого по составу сплава VT5 содержание кислорода составляет  $4,2 \text{ мг/см}^2$ , а толщина газонасыщенного слоя 2 мм. Следует отметить, что в настоящее время газонасыщенный слой с поверхности титановых отходов удаляется с помощью дробеструйной обработки и химическими методами. Мы измеряли содержание кислорода в существенно более тонком слое (2 мкм), в этом слое содержание кислорода  $\sim 0,02 \text{ мг/см}^2$ , однако, если предположить (в соответствии с современными представлениями о структуре газонасыщенного слоя на поверхности титана [22]), что содержание кислорода линейно убывает начиная с глубины 2 мкм и до глубины 2 мм, то рассчитанное таким образом общее содержание кислорода в слое будет близко к результатам работы [19]. Сотрудниками ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» проводилось исследование стружки сплава 6Al-4V, образовавшейся при механической обработке билетов после различных видов обработки поверхности: 1) дробеструйная обработка + щелочное травление + кислотное травление + механическая обработка с охлаждением эмульсией (существующая технология); 2) дробеструйная обработка + кислотное травление + механическая обработка с охлаждением эмульсией (экспериментальный режим); 3) дробеструйная обработка + механическая обработка с охлаждением эмульсией (экспериментальный режим).

Исследование проводилось с целью выбора оптимального режима обработки, обеспечивающего минимальное газонасыщение. Среднее значение (из 30 измерений) кислорода 0,85 %, азота – 0,071 %. Измерение

проводилось методом ядерных реакций на глубине 1,75–2,25 мкм с поверхности стружки. В нашем случае содержание кислорода в зоне контакта на этой глубине составляет в среднем 0,6 % (максимум – 1,0 %); содержание азота в контактах составляет в среднем 0,1 % (максимум – 0,25 %). Видим, что эти цифры близки, в нашем случае меньше кислорода, но больше азота, это может быть связано с тем, что у нас нагрев происходит на очень короткое время, но до более высокой температуры. Учитывая тот факт, что расстояния между контактами много больше, чем размеры контактов (рисунок 13), можем сделать вывод о том, что вклад точек сварки в общее газонасыщение переплавленного металла незначителен. Это соответствует результатам работы [12], где этот вопрос исследован.

Рассмотрим теперь возможность использования брикетов для изготовления прессованных расходоуемых электродов. Брикет в силу своей формы, характера поверхности (рисунок 3) и пористости будет хорошо схватываться с титановой губкой. Прочность брикетов [14, 15] достаточна для транспортировки и перегрузки, но при давлениях прессования расходоуемого электрода она не будет препятствовать деформации и разрушению брикета. Это позволяет надеяться на формирование достаточно прочного электрода, даже при условии введения значительного количества отходов и других компонентов. При плавлении титановых сплавов методом ВДП компоненты прессованного электрода (и стружка в том числе) успешно расплавляются под действием дуги. Возможность падения брикетов в жидкую ванну металла представляется маловероятной. Более вероятной представляется возможность падения фрагментов брикета или отдельных кусков стружки. Однако благодаря пористости брикетов, тонуть они начнут только тогда, когда полностью пропитаются жидким металлом.

При нагревании расходоуемого электрода содержание газовых примесей в газонасыщенном слое на поверхности отходов, и в т. ч. в контактах, будет снижаться за счёт диффузии примесей вглубь металла. Грубые оценки показывают, что время выравнивания концентрации составит доли секунды, это коррелирует с тем обстоятельством, что в нашем случае газонасыщенный слой образовался за времена  $\sim 1$  мс, а лимитирующей стадией газонасыщения является диффузия газов в металле [22]. При плавке металл находится в нагретом состоянии существенно большее время. Кроме того, как правило, слитки выплавляют двойным или тройным ВДП, которые обеспечивают однородное распределение легирующих элементов и примесей.

Для изготовления расходоуемых электродов могут использоваться также и композитные брикеты, изготовленные из стружки и кускового материала: кусковых отходов и лигатуры. Количество кускового материала может достигать 50 % от объема брикета и до 75 % его веса. В этом случае расходоуемый электрод может изготавливаться только из титановой губки и брикетов, при последовательном дозировании губка – брикеты – губка, можно гарантировать равномерное распределение отходов и лигатуры по

длине электрода, а в самых опасных с точки зрения прочности электрода местах – на стыках двух прессовок, иметь только губку. У нас имеется опыт использования подобных электродов, полученных методом пролива [18], в гарнисажных печах [12]. Для вовлечения дисперсных порошкообразных материалов можно использовать мелкодроблённую стружку и порошки. Совместно с ООО «Новые технологии инжиниринг» нами разработан эффективный метод получения металлических порошков, из стружки и отходов, путём их механического измельчения, в т.ч. из мягких материалов (медь), и в т.ч. мелкодисперсных. Ранее это считалось невозможным. Эффект достигается за счёт высокой концентрации механической энергии при высокой скорости соударения частиц. Из титанового порошка получены пробные брикеты [23].

В ходе работы получены брикеты из стружки титанового сплава 3М. Размер брикета: 175 x 64 x 50 мм; плотность 1,1 г/см<sup>3</sup> (пористость 75 %); масса 590 г. Амплитуда импульса тока 250 кА, длительность 350 мксек. Прочность брикетов на излом составила:  $\sigma = 0,245 \pm 0,1$  МПа. Получены брикеты из стружки титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al. Размер брикета: диаметр 42 мм, высота 94 мм; плотность 0,55 г/см<sup>3</sup> (пористость 90 %); масса 72 г. Амплитуда импульса тока 200 кА, длительность 350 мксек.

Исследовались места контакта между фрагментами стружки (точки сварки). Показано, что при брикетировании титановых сплавов содержание кислорода в зоне контакта на глубине 1,75–2,25 мкм с поверхности стружки составляет в среднем 0,6 % (максимум – 1,0 %); содержание азота в контактах составляет в среднем 0,1 % (максимум – 0,25 %) что примерно равно газонасыщению поверхности стружки, образующейся при обработке полуфабрикатов, и не может быть препятствием к их использованию. Перед тем, как перейти к промышленному использованию электроимпульсной технологии брикетирования, необходимо изготовить брикеты, пусть и относительно небольшого размера, но с плотностью  $\sim 2$  г/см<sup>3</sup>. Для этой цели модернизировать имеющуюся установку. Запрессовать в электрод брикеты и выплавить слиток, с последующим изготовлением биллетов и прутков с проведением контроля как общего содержания газовых примесей, так и однородности химического состава, ультразвукового контроля с целью выявления газонасыщенных включений.

#### **8.6. К вопросу о механизме формирования прочных контактов при электропластическом компактировании дисперсных металлических сред**

Когда мы начинали работу по брикетированию металлической стружки, нам было хорошо известно, что жидкие проводники быстро разрушаются за счёт развития магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей [5]. С другой стороны, было показано, что при электроимпульсном спекании металлических гранул происходит их

твердотельное спекание [24], при котором определяющую роль играет электропластический эффект [3]. Поэтому первоначально считалось, что формирование брикетов осуществляется за счёт твердотельных механизмов спекания контактов. Первые опыты по брикетированию стружки, в которых изучался химический состав брикетов [12], казалось бы, подтверждали это предположение, т. к. не наблюдалось значительного окисления титана, химическая активность которого при температуре плавления весьма высока. Однако при последующем изучении контактной зоны, которое представлено выше [17], обнаружены следы плавления металла. Параллельно установлено что, несмотря на сильный нагрев, существенного окисления и загрязнения металла азотом не происходит даже в зоне контакта, благодаря краткости воздействия. В связи с этим встал вопрос об устойчивости и поведении жидкого металла в зазоре между электродами (фрагментами стружки). С этой целью выполнено специальное исследование [25, 26] в котором показано, что контактные поверхности будут сближаться, жидкий металл будет выдавливаться в стороны, а площадь контакта и его проводимость будут расти. Перетяжная МГД неустойчивость [5] и перегревная неустойчивость в этих условиях не развиваются, т. к. длина волны неустойчивости больше предполагаемой толщины расплавленного слоя, винтовая МГД неустойчивость может проявляться в более медленных процессах. Эта оценка справедлива для любых квазиплоских контактов при пропускании импульсного тока длительностью от десятков микросекунд до миллисекунд.

Таким образом, хотя электропластический эффект может играть некоторую роль в процессе развития контактов до начала их плавления, формирование прочных сварных контактов между частицами стружки происходит за счёт плавления металла в контактной зоне, последующего увеличения площади контакта и быстрой кристаллизации металла после прекращения импульса тока.

### **8.7. Использование электропластической технологии брикетирования металлической стружки для изготовления лигатур**

Проблема эффективного легирования и раскисления металла одна из основных проблем как черной, так и цветной металлургии [28–30]. Для легирования используют дорогостоящие материалы, такие как ванадий, титан, олово и цинк, а иногда серебро, платину и палладий; при этом многие легирующие материалы обладают высокой химической активностью, могут окисляться и испаряться в процессе плавки: например, алюминий, ванадий, цинк, щелочные металлы. Усвоение лигатуры в ряде случаев низкое [29, 30]. Проблема особенно обострилась в настоящее время в связи с дефицитом многих легирующих элементов, а также с тем, что в технике всё шире используются специальные высоколегированные материалы. Одно из

направлений модернизации предприятий чёрной металлургии – переход к внепечной обработке стали, при которой легирование и раскисление металла осуществляется в ковше [29]. Этот процесс позволяет экономить лигатуру, так как исключаются её потери в процессе плавки, а также легировать металл более точно. Однако ужесточаются требования к легирующим материалам, т. к. надо обеспечить быстрое и эффективное усвоение лигатуры и её равномерное распределение по всему объёму расплава. Крупные куски лигатуры не успевают усваиваться и могут примерзнуть ко дну ковша. В то же время мелкие куски с размером менее 10–15 мм, значительное количество которых образуется при дроблении лигатуры, не проникают в глубину расплава, и легирующие элементы теряются за счёт окисления, испарения, перехода в шлак или флюс.

Для создания новых легирующих материалов мы предлагаем использовать электропластическую (электроимпульсную) технологию брикетирования металлической стружки [11–16]. Технология позволяет получать брикеты из любых измельчённых электропроводящих материалов, высокопрочных, реакционных, хрупких, в частности титановых сплавов и чугуна, интерметаллидов и т. п. Другим её достоинством является возможность получения брикетов с любой пористостью, начиная от насыпной плотности стружки. Эта технология позволяет вернуть в металлургический процесс любую металлическую стружку, в т. ч. высокопрочных металлов, а также другие виды измельчённых металлоотходов, в т. ч. измельчённый легковесный лом. В ходе исследований показано, что процесс электроимпульсного брикетирования металлической стружки – сложный электрофизический процесс. Возможность получения брикетов из стружки и других отходов чёрных и цветных металлов подтверждена экспериментально [12–16]. Однако в публикациях по этой теме использование брикетов для легирования металла рассматривалось в качестве одной из гипотетических возможностей их применения, здесь же этот вопрос рассмотрен подробно, приведены экспериментальные результаты.

Первая возможность состоит в том, чтобы непосредственно использовать брикеты, изготовленные из стружки металла – лигатуры для легирования. Брикеты, изготовленные по электрофизической технологии, обладают большой пористостью, причём пористость брикетов можно регулировать практически от насыпной плотности исходной стружки (10–15 % от плотности металла) и до 50 % от плотности металла. За счёт пористости брикетов лигатура усваивается значительно быстрее, чем при использовании кускового металла. Если плотность легирующего металла больше плотности расплава, куски лигатуры будут тонуть и примерзнуть к дну, а брикеты можно вводить в заданную зону расплава. Стоимость



брикетов существенно ниже, чем стоимость кусковых отходов, обычно используемых для легирования.

Этот вариант использования брикетов для легирования металла нами исследован экспериментально. Стояла задача за счёт микролегирования титаном (введением до 0,2 % титана) улучшить механические свойства отливок из алюминиевых сплавов, выплавляемых из отходов алюминия. Были изготовлены брикеты из смешанной деклассированной титановой стружки с плотностью  $2 \text{ г/см}^3$ , в количестве около 20 кг. Фотография брикета приведена на рисунке 3.

Брикеты вводились на поверхность расплава и плавали по ней в полупогруженном состоянии. При этом предполагалось, что титан частично растворится в алюминии. Надежды на улучшение свойств сплава связывались как с микролегированием титаном, так и с тем, что титановые брикеты соберут на себя часть растворенных газов и окисных плёнок. Результаты опыта показали, что в сплаве присутствует титан, а его механические характеристики улучшились. Таким образом, продемонстрирована практическая осуществимость этого подхода.

Чистые металлы, как правило, не используются для легирования сплавов, и хотя использование брикетов из стружки расширяет возможность использования чистых металлов, легирование в основном осуществляется с использованием специальных лигатур, в частности ферросплавов. Лигатуры состоят из двух или более элементов, и состав их задается таким образом, чтобы температура плавления лигатуры была максимально близка к температуре расплава легируемого металла. Существует много способов изготовления лигатур [30], один из наиболее распространенных – получение лигатур сплавлением чистых металлов с последующим измельчением полученного слитка или гранулированием расплава.

Способ является дорогостоящим, т. к. требует больших затрат энергии, связанных с плавкой и измельчением или гранулированием металла. В то же время энергия химического взаимодействия компонентов используется неэффективно, и, более того, ее выделение может приводить к перегреву и даже разбрызгиванию металла. Используется дорогостоящее оборудование (печи, дробилки, грануляторы). Легирующие элементы теряются как в процессе плавки, так и в процессе дробления или гранулирования, лигатура загрязняется примесями. Для изготовления лигатуры используют дорогостоящие материалы слитки или кусковые отходы.

Изготовленная лигатура состоит из кусков или гранул компактного металла. Плотность лигатуры не может регулироваться, и соответственно нет возможности управлять движением кусков лигатуры в расплаве. Крупность кусков лигатуры зачастую также не может регулироваться в нужных пределах, более того, образуется значительное количество мелкой фракции, которая не проникает в расплав и не усваивается, а потому должна быть

отсеяна. Кроме того, существует противоречие: крупные куски лигатуры легко пробивают слой флюса или шлака и глубоко проникают в расплав, однако их усвоение требует значительного времени. Мелкие куски могут не пробить слой флюса или шлака либо остаются вблизи поверхности расплава, где условия усвоения лигатуры менее благоприятны.

Для замены кусковой лигатуры можно использовать брикеты, изготовленные из смеси стружки разных металлов, например, для замены ферротитана можно использовать брикеты, изготовленные из смеси стальной и титановой стружки. Преимущества такого подхода состоят в том, что лигатура изготавливается из дешёвого исходного сырья, исключаются операции плавки и дробления материала, и можно надеяться, что такой легирующий материал будет быстро и эффективно усваиваться. Регулируя плотность, вес и высоту сбрасывания брикета, можно добиться того, чтобы при сбрасывании брикет погружался на заданную глубину. А поскольку брикет пористый и имеет развитую поверхность, поскольку при разогреве начинается химическая реакция между компонентами, которая, как правило, связана большим выделением энергии, можно полагать, что брикет в расплаве будет быстро разрушен, а его компоненты быстро и эффективно усвоены.

Возможность получения композитных брикетов и использования их для легирования металла исследована экспериментально на примере ферротитана. Изготовлены три пробных брикета весом по 100 г, содержащие 30 г. стальной стружки (низкоуглеродистая сталь 3) и 70 г. титановой стружки (сплав 3М–Ti, 4 % Al). Эти брикеты являются аналогом 70 % ферротитана. Брикеты переплавлены в лабораторной электропечи вместе с кусковыми стальными отходами, усвоение титана хорошее. Этим методом можно изготавливать лигатуры из тех металлов, стружка которых имеется в достаточном количестве.

Следующий подход пригоден для любых легирующих элементов. Он состоит в том, что изготавливаются композитные брикеты из стружки и кускового материала. В качестве кускового материала могут использоваться куски или гранулы легирующего элемента, а также куски лигатуры обычного типа, причём наиболее целесообразно использовать мелкую фракцию лигатуры, которая не проникает в расплав и должна отсеиваться. При этом брикеты выступают в качестве своеобразного контейнера, позволяющего доставить лигатуру вглубь расплава.

Этот подход исследован экспериментально при легировании титановых сплавов. Стояла задача из кусковых титановых отходов сплава ТЛ5 (3,5–5,0 % Al, 1,5–2,5 % V) получить металл для фасонного литья сплава С5 ASTM B367 (5,5–6,75 % Al, 3,5–4,5 % V). Плавка проводилась в гарнисажной вакуумно-дуговой печи Нева-2, вес плавки 100 кг. Расходуемые электроды изготавливались методом пролива [18], т. е. кусковые отходы укладывались

в стальную изложницу и заливались остатками металла. При этом следовало равномерно распределить лигатуру в объеме расходуемого электрода. Для решения этой задачи было предложено изготовить брикеты из титановой стружки с включениями кусков алюминия и алюмованадия и равномерно распределить их между кусковыми титановыми отходами. Для дополнительного легирования металла необходимо увеличить содержание и ванадия, и алюминия в сплаве на 2 %, т. е. добавить по 2 кг того и другого металла. Мы использовали алюмованадий, содержащий 25,5 % алюминия и 74,5 % ванадия. Таким образом, необходимо ввести 2,7 кг алюмованадия и 1,3 кг алюминия. Это количество распределено на 12 брикетов, в каждый из которых надо ввести по 225 г алюмованадия и 109 г алюминия, т. е. 334 г лигатуры.

Для изготовления брикетов использовалась титановая стружка сплава 3М (Ti, 3,5–5 % Al) с размером витка ~ 20–30 мм, по 350–400 г на один брикет. Алюмованадий использовался в виде кусков металла осколочной формы с размером от 15 мм до порошкообразных частиц размером менее 1 мм. Алюминий вводился в виде кусков размером 10 x 30 x 40 мм. Слитки технически чистого алюминия А85 (99,85 % алюминия), 15 кг, резались на куски, молотом проковывались до толщины 10 мм и резались на гильотине. В нижнюю часть цилиндрической фарфоровой пресс-формы засыпалась попеременно стружка и куски алюминия, в верхнюю стружка и куски алюмованадия. Изготавливались брикеты высотой 100 мм. Осыпь составляла не более 5 г, т. е. менее 1 % от веса брикета. Осыпь состояла из стружки и мелких (менее 1 мм) кусков алюмованадия. В дальнейшем был изменён порядок заполнения брикета: алюмованадий загружался в его среднюю часть диаметром 40 мм, а остальное пространство заполнялось стружкой. После этого частицы алюмованадия в осыпи не наблюдались.

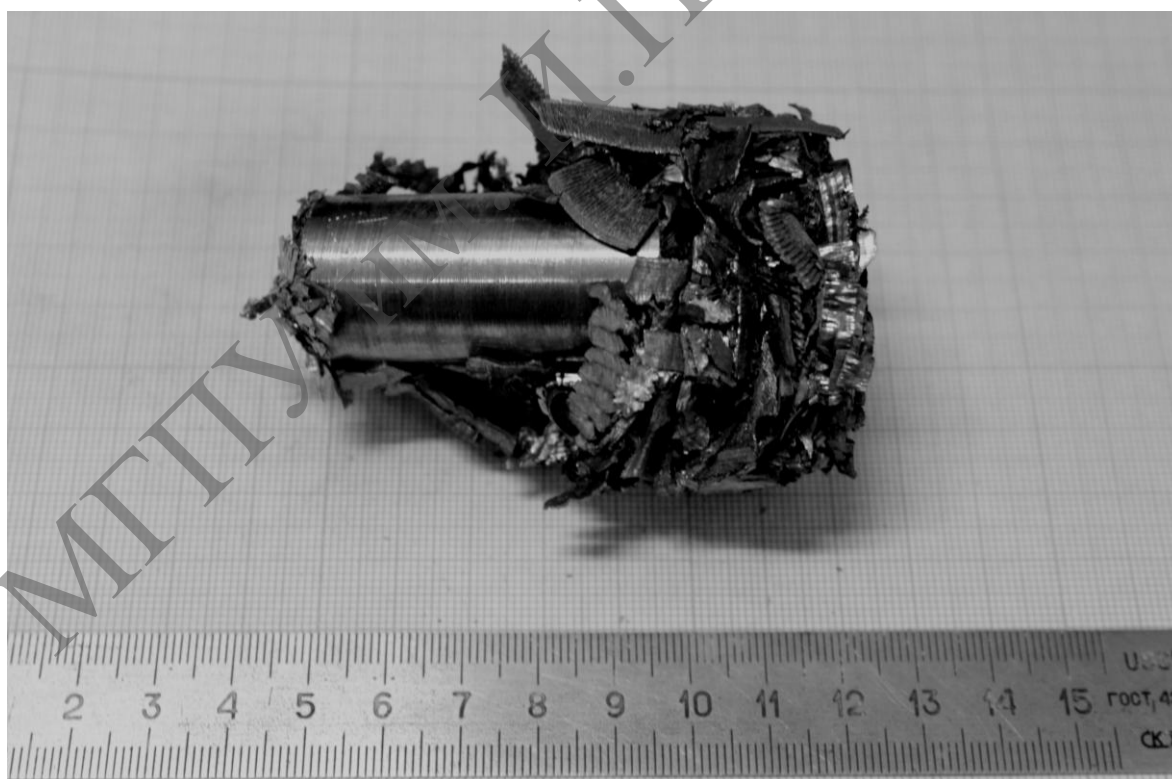
Всего было изготовлено 36 брикетов для проведения трех плавов. Плавки были проведены, их результаты показали, что состав сплава соответствует предварительным расчетам и условиям опыта. Таким образом, поставленная задача решена, получены композитные брикеты из металлической стружки и кусков металла разного фракционного состава, в том числе крупных и с более высокой электропроводностью, чем у материала стружки. Показана возможность использования таких брикетов в металлургическом процессе.

В настоящее время идёт техническое перевооружение предприятий как черной, так и цветной металлургии, эти предприятия переходят к использованию новых современных технологий. Поэтому, на наш взгляд, целесообразно провести более глубокое и систематическое исследование возможностей использования электропластической технологии брикетирования металлической стружки для легирования и раскисления металла, с участием заинтересованных предприятий. В нашем распоряжении имеется модельная

установка (рисунок 2), на которой можно получать опытные партии брикетов из любых металлов и сплавов, в том числе из смеси стружки разных металлов, а также композитные брикеты. Продемонстрирована возможность получения композитных брикетов с включениями кусков материала не только с высокой, но и с низкой электропроводностью.

На рисунке 21. представлен фрагмент композитного брикета из высокопрочной титановой стружки с включением кускового титана, причём размер куска титана довольно большой: он составляет примерно половину размера брикета по диаметру и по высоте. Видим, что этот кусок титана не просто зажат, но местами и приварен к титановой стружке. В качестве материала с низкой электропроводностью использованы куски метало-содержащей горной породы с удельным электрическим сопротивлением  $\sim 10^6$  ом см, т. е. на 11 порядков больше, чем у стали. Стружка стали «сталь 3» используется в качестве основы брикета. Фрагмент такого брикета показан на рисунке 22.

Совместно с ООО «Новые технологии инжиниринг» разработан эффективный метод получения металлических порошков размолотом стружки, получены пробные брикеты из порошка (рисунок 23.) и брикеты с включениями из стеклянных шариков (рисунок 24.), содержание стеклянных шариков составляло 20 и 30 % по насыпному объёму [23, 33].



**Рисунок 21. – Фотография фрагмента брикета из стружки высокопрочного титанового сплава ВТ20 с добавлением куска титана с размером: диаметр: 20 мм, длина: 48 мм, массой 68 г. Размер брикета: диаметр 50 мм, высота 90 мм; масса 215 г плотность 1,2 г/см<sup>3</sup>**



Рисунок 22. – Фотография фрагмента композитного брикета из стружки стали Ст. 3 с добавкой кусков материала с малой электропроводностью (горной породы).  
Размер брикета: 200x60x60 мм; плотность 1,4 г/см<sup>3</sup>; масса 1 кг (400 г стружки и 600 г породы)

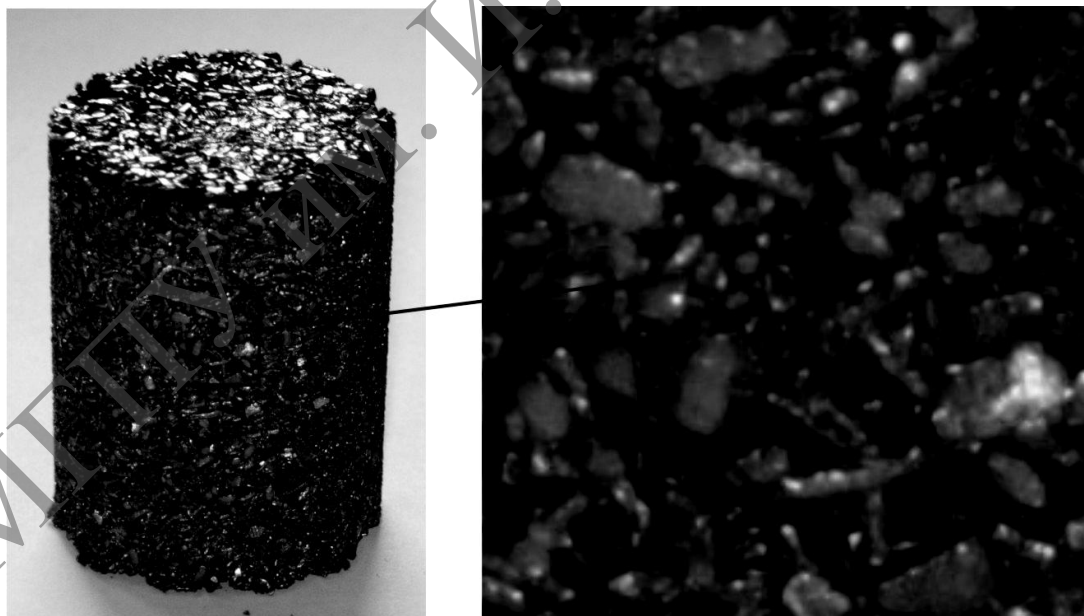
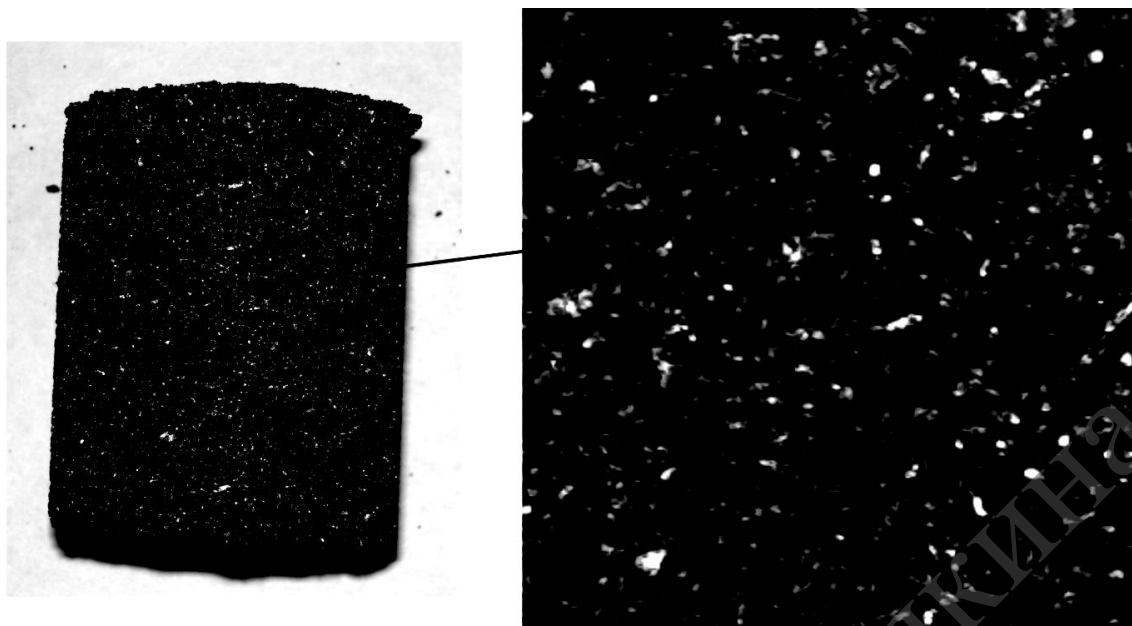


Рисунок 23. – Брикет из порошка титана (диаметр 35, высота 46,5 мм; масса 103 г, плотность 2,3 г/см<sup>3</sup>; пористость 50 %; осечь порошка 2,5 г, 2,4 %) и увеличенное изображение его центральной части 1x1 см



**Рисунок 24. – Композитный брикет из порошка титана и стеклообразных минеральных шариков (размер брикета: диаметр 35 мм, высота 40,5 мм; масса 109 г, плотность 2,8 г/см<sup>3</sup>; осыпь порошка 3,4 г (3,1 %); содержание шариков по насыпному объёму 20 %, по весу 16 %, в объёме брикета стекло 9 %, титан 55 %, поры 36 %) и увеличенное изображение его центральной части 1 x 1 см**

Таким образом, показана возможность вовлечения в брикеты, причем в значительном количестве, любых материалов, как проводящих, так и диэлектрических. Электропроводящие материалы могут занимать до 50 % объёма готового брикета, а диэлектрические до 30 %. Это особенно важно для изготовления лигатур, однако этот метод может использоваться и для возвращения в металлургический процесс любых видов дисперсных отходов. В качестве примера можно привести железную окалину, которая на ряде предприятий образуется в значительных количествах. Её можно брикетировать совместно с мелкой чугуновой или стальной стружкой и вводить в плавку [31–32].

#### **8.8. Электропластическое компактирование – перспективный метод получения пористых материалов**

Современная технологическая эпоха вызвала большую потребность в пористых металлических материалах [9, 24, 34–38]. Их используют в качестве фрикционных и антифрикционных материалов, фильтров и носителей для фильтров, катализаторов, «потеющих сплавов» пористых электродов, огнепреградителей. Спеченные в вакууме изделия из титанового порошка используются в качестве гетеропоглотителей электровакуумных ламп и других вакуумных приборов, накопителей водорода. Пенометаллы используют в качестве лёгких заполнителей и теплоизоляции, прежде всего в авиационной технике, начинают применять для изготовления различных деталей, кожухов, поддонов бамперов и т. п., прогнозируется резкий рост потребления таких материалов [9, 34, 38]. В целом пористые металлы заняли

определенную «нишу» среди конструкционных материалов. Расширению этой «ниши» препятствует высокая стоимость таких материалов, которая связана как со сложностью получения порошков [23], металлических [8, 39] и пенометаллических [9, 40] гранул, так и со сложностью формирования пористого материала [9, 24, 34–38, 41, 42]. Пористые металлические материалы получают из порошков и гранул, как правило, путём спекания, в т. ч. спекания в вакууме или флюсе. В этом процессе в некоторых случаях используется импульсный электрический ток [9, 24, 34, 36], в частности, при пропускании коротких импульсов тока получают изделия из титановых гранул с довольно высокой прочностью,  $\sigma_v = 20\text{--}40$  МПа [36].

Для получения дешёвых материалов необходимо использовать малозатратную технологию и дешёвое исходное сырьё, наиболее дешёвое сырьё – отходы. Использование отходов для производства материалов позволяет превратить их в ценное техногенное сырьё [1, 6, 7, 10]. Из отходов производится значительное количество материалов весьма широкой номенклатуры, однако металлические отходы (которые составляют существенную часть от общего количества отходов производства и потребления [6, 7]) практически не используются для этой цели. Металлическая стружка дешёвое и доступное сырьё, имеющееся в значительных количествах. Ежегодно в России собирается более 800 тысяч тонн стальной стружки [43], тысячи тонн стружки цветных металлов. В то же время, стружка собирается не полностью, а перерабатывается неэффективно, что ведёт к потере до 50 % металла [43]. Ранее делались попытки получения пористых металлических материалов и компактных заготовок из титановой стружки [44]. Стружку спекали в вакууме или атмосфере инертного газа при температуре  $\sim 800$  °С, и получали изделия с пористостью от 10–90 %. Однако, такая технология является малопродуктивной и требует больших затрат на нагрев и спекание, создание вакуума или получение инертного газа. Стоимость таких материалов достаточно высока и близка к стоимости аналогичных материалов из гранул. Преимущество получения материала из стружки утрачивается, и в целом такие материалы и полуфабрикаты не нашли широкого применения.

Работы по электропластическому компактированию (брикетированию) металлической стружки первоначально были направлены на более рациональную переработку (переплав) стружки в виде брикетов. Однако этот подход может быть использован и для получения широкой номенклатуры дешёвых пористых материалов и изделий. Электропластическая технология брикетирования обеспечивает высокую производительность процесса и не требует больших затрат энергии, т. е. является малозатратной. При больших объёмах производство брикетов из стальной стружки с целью перевозки и последующего переплава экономически оправдано за счёт более высокой стоимости брикетов. Однако более целесообразно использовать металлобрикеты в качестве специальных материалов.

Металлобрикеты – новый перспективный пористый материал, который

в ряде областей может заменить традиционные материалы, такие, как листовой металл и пластик; дерево, ДСП и фанеру; пенопласт и другие пенополимеры; использоваться в качестве материала для создания противопожарных перегородок, огнепреградителей и т. п.; электрорезистивных материалов, например, для изготовления электрических сопротивлений, в т. ч. мощных балластных сопротивлений, тепловыделяющих элементов; а также фильтров, звуко, вибро, радиопоглощающих материалов и т. д.

Металлобрикеты – материал с открытой пористостью, плотность которого может регулироваться в диапазоне 10–50 % от плотности компактного металла, при использовании недроблёной стружки плотность может быть ещё уменьшена. Существует возможность производить композиты с электропроводящими и диэлектрическими включениями, например, кусками высокопористой керамики, гранулами, волокнами и т. п. Если материал включений в последующем удалять, например, растворением, открывается способ получения материалов с большей пористостью. Брикеты можно сваривать с листовым металлом и фольгой, что позволит получать материал более высокой прочности. Поверхность брикетов можно покрывать пенометаллом, причём не обязательно одноимённым; можно изготавливать материал в виде пластин, из которых по той же методике можно сваривать панели любого размера; можно изготавливать цилиндрические и конические детали, трубы.

Другая возможность заключается в том, чтобы переработать легковесные металлоотходы в порошок, а затем изготавливать пористые изделия из порошка. Мы предлагаем, основываясь на первых удачных опытах, новую концепцию получения пористых изделий из металлических порошков. Её отличительными особенностями является получение сравнительно дешёвых металлических порошков из легковесных металлических отходов путём их механического измельчения, а затем брикетирование порошков по электроимпульсной технологии, которая ранее использовалась для брикетирования металлической стружки [23].

Получение материалов с большей, в том числе и с высокой пористостью возможно при использовании материалов с малой насыпной плотностью, например, недроблёной стружки, чешуек, волокон, гранул пенометалла [9, 40] и при введении в брикет включений, которые затем удаляются.

Прочность получаемого материала может быть увеличена при увеличении пропускаемого тока. Кроме того, можно подвергать полученный пористый материал спеканию. В работе [36] такой подход использовался для образцов, полученных из титановых гранул. Электроимпульсное компактирование с последующим спеканием при пониженной температуре позволило получить материал с большей пористостью и такой же прочностью, как и материал полученный обычным спеканием. Кроме того, в этом процессе сохранялась исходная мелкозернистая микроструктура гранул.



## **Выводы**

Брикеты, получаемые из металлической стружки и отходов по электропластической технологии компактирования, выгодно использовать в составе шихты для переплава, даже при выплавке относительно дешевых черных металлов.

Показано, что такие брикеты можно использовать в значительных количествах и при выплавке дорогостоящих реакционных металлов, таких как титан.

Целесообразно использовать брикеты для легирования металлов.

Более целесообразно изготавливать конструкционные и функциональные материалы в т. ч. фильтры, как из отходов, так и из порошков, металлических и пенометаллических гранул, чешуек, волокон.

В состав образцов могут вводиться значительные количества металлических и диэлектрических включений, причём их размер может быть как много больше, так и несколько меньше характерного размера частиц материала матрицы.

Пористость материала может варьироваться от насыпной пористости исходного материала и до 50 %, (для дробленой стружки в диапазоне от 90 до 50 %). Предлагаются подходы, позволяющие получать материал с большей пористостью.

Получены материалы с прочностью на разрыв  $\sim 500$  кПа. Однако прочность может быть увеличена при использовании импульсного тока большей амплитуды. Кроме того, она может быть увеличена спеканием.

### Использованная литература:

1. Юсфин, Ю.С. Ресурс-экологические проблемы XXI века и металлургия / Ю.С. Юсфин, В.С. Лисин. – М.: Высш. шк., 1998. – 447 с.
2. Сизяков, В.М. Стратегические задачи металлургического комплекса России / В.М. Сизяков, А.А. Власов, В.Ю. Бажин // Цветные металлы. – 2016. – № 1. – С. 32–37.
3. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы: монография / Ю.В. Баранов [и др.] – М.: Изд-во МГИУ, 2004. – 843 с.
4. Шнеерсон, Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов / Г.А. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
5. Абрамова, К.Б. Магнитогидродинамическая неустойчивость жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током / К.Б. Абрамова, Н.А. Златин, Б.П. Перегуд // ЖЭТФ. – 1975. – Т. 69, вып. 6. – С. 2007–2022.
6. George Tchobanoglous, Frank Kreith Handbook of Solid Waste Management. – McGraw-Hill, 2008. – 950 p.
7. Robin Murray “Zero waste”, Greenpeace Environmental Trust, 2002. пер. с англ.: Мюррей Р. Цель – Zero Waste, М.: ОМННО «Совет Гринпис», 2004. – 232 с.
8. Новые способы гранулирования металлов./ К.Б. Абрамова [и др.] // Цветные металлы. – 1991. – № 10. – С. 57–60.
9. Самуйлов, С.Д. Новая концепция получения пористых металлических материалов / С.Д. Самуйлов // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности: сборник материалов. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2016. – С. 336–338.
10. Оборудование по переработке вторичных черных металлов / В.П. Тамуров [и др.] – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.
11. Самуйлов, С.Д. Электроимпульсная установка для брикетирования металлических отходов / С.Д. Самуйлов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken Germany, 2015. – 80 с.
12. Абрамова, К.Б. Брикетирование титановой стружки под воздействием коротких импульсов электрического тока / К.Б. Абрамова, С.Д. Самуйлов, Ю.А. Филин // Цветные металлы. – 1998. – № 12. – С. 70–74.
13. Abramova, K.B. Technology of titanium shavings briquetting. «Titanium’99» / K.B. Abramova, S.D. Samujlov, Yu.A. Filin. // Science and Technology. – 2000. – V 3. – P. 1311–1320.
14. Формирование брикетов из отдельных металлических частиц и диэлектрика, под воздействием коротких импульсов электрического тока большой плотности / К.Б. Абрамова [и др.] // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 4. – С. 122–127.
15. Самуйлов, С.Д. Электрофизический метод брикетирования металлической стружки / С.Д. Самуйлов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken Germany, 2011. – 136 с. ISBN 978-3-8433-2366-6.

16. Самуйлов, С.Д. Электроимпульсная технология брикетирования стружки и других отходов черных металлов / С.Д. Самуйлов // Черные металлы. – февраль 2009. – С. 14–19.
17. Газонасыщение точек сварки при брикетировании титановых сплавов электроимпульсным методом / И.Ю. Пузаков [и др.] // Технология лёгких сплавов. – 2011. – № 1. – С. 98–107.
18. Способ компактирования кусковых отходов сплавов титана: патент РФ / А.С. Баранцев, А.В. Жильцов А.В. Ефимов, Ю.А. Филин – № 2081727 от 5.12.94., БИ. – 1997. – № 17.
19. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / А.Г. Братухин [и др.]. – М.: ВИЛС, 1998. – 292с.
20. Абрамова, К.Б. [и др.] // ФТТ. – 1998. – Т.40, вып.6. – С. 957–965.
21. Материаловедение и технология металлов / Фетисов, Г.П. [и др.]. – М.: Высш. шк., 2000. – 638 с.
22. Пульцин, Н.М. Взаимодействие титана с газами / Н.М. Пульцин. – М: "Металлургия", 1969. – 216 с.
23. Получение металлических порошков механическим измельчением стружки или лома и пористых образцов электроимпульсным методом / В.И. Игнатов [и др.] // Цветные металлы. – 2010. – № 1. С. 80–84.
24. Гегузин, Я.Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – М: Наука, 1984. – 311 с.
25. Самуйлов, С.Д. К вопросу о поведении и устойчивости жидкого металла в квазиплоских электрических контактах / С.Д. Самуйлов // ЖТФ. – 2016. – Т.86, вып. 6. С. 17–33.
26. Samuilov, S.D. On the Behavior and Stability of a Liquid Metal in Quasi-planar Electric Contacts / S.D. Samuilov // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61, No. 6. – P. 815–821.
27. О возможности использования электрофизической технологии брикетирования металлической стружки для изготовления лигатур / Ю.Н. Бочаров [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 6 (70). – С. 125–130.
28. Колбасников, Н.Г. Структура, энтропия, фазовые превращения и свойства металлов./ Н.Г. Колбасников, С.Ю. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2006. – 363 с.
29. Перспективные стратегии легирования стали в ковше./ С. Маркс [и др.] // Черные металлы. – 2007. – № 4.
30. Ферросплавы: справочник / В.Г. Мизин [и др.]. – Москва: Metallurgy, 1992. – 415 с.
31. Троицкий, О.А. Сварка при упаковке стружечных отходов / О.А. Троицкий, С.Д. Самуйлов // Сварка. Реновация. Триботехника: тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции. – ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технологический институт (филиал), 2015. – С. 148–152.

32. Технология деванадации чугуна с присадкой содержащих окалину брикетов на основе стальной стружки / О.А. Троицкий [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 73–76.
33. Самуйлов, С.Д. Электроимпульсное компактирование – перспективный метод получения пористых материалов / С.Д. Самуйлов // Технология металлов. – 2012. – № 9.
34. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / Ю.В. Левинский [и др.]; под общ. ред. Ю.В. Левина. – М.: Экомет, 2005. – 520 с.
35. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П.А. Витязь [и др.]. – М.: Metallurgia, 1993. – 240 с.
36. Контактобразование при электроимпульсном спекании полидисперсных титановых гранул / К.Е. Белявин [и др.] // Цветные металлы. – 1991. – № 10. – С. 55–57.
37. Технология получения порошковых пористых материалов на основе алюминия спеканием на воздухе в присутствии флюса и присадок / В.К. Нарва [и др.] // Цветные металлы. – 2007. – № 4. – С. 101–104.
38. Хохлов, М.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (обзор) / М.А. Хохлов, Д.А. Ищенко // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 60–65.
39. Samuilov, S.D. Metal Grain Production Bay Hight Density Electric Current Use./ S.D. Samuilov // New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application: in 15th International School-Conference / KnE Life Sciences, 2017. – P. 524–533. DOI 10.18502/67.
40. Способ получения металлических гранул с открытой пористостью: патент РФ./ С.Д. Самуйлов. – № 2638608 от 04.10.16., БИ № 35, 14.12.17.
41. Samuilov, S.D. Electropulse Compaction of Metal Shavings and Waste Products./ S.D. Samuilov // New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application: in 15th International School-Conference / KnE Life Sciences, 2017. – P. 519–523. DOI 10.18502/66
42. Самуйлов, С.Д. Диспергирование и компактирование металлов с использованием электрического тока большой плотности / С.Д. Самуйлов // Технология металлов. – Ч. 1. – 2018. – № 1.
43. Евдокимов, А.Я. Издержки железного века / А.Я. Евдокимов // Рынок вторичных металлов. – 2001. – № 5. – С. 38–40.
44. Рудской, А.И. Горячая экструзия капсул с титановой стружкой / А.И. Рудской, В.Л. Гиршов. // металлообработка. – 2005. – № 6(30).

## ГЛАВА IX. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И МОРФОЛОГИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

### 9.1. Гистерезисные потери при локально-контактном деформировании металлов

Контактное нагружение является наиболее распространенным случаем силового взаимодействия деталей машин, узлов, конструкций. Это взаимодействие возникает в сопряжённых элементах при их совместной работе. Сопротивление материала упругопластической контактной деформации является одним из важнейших факторов, определяющих условия трения и износа деталей машин. Одним из параметров, определяющих величину деформационной составляющей внешнего трения, является величина гистерезисных потерь, возникающих в деформированном металле.

Исследован упругий гистерезис, характеризующийся неоднозначной зависимостью механического напряжения от деформации упругого тела при приложении циклической нагрузки и её снятии.

Показано, что использование импульсного тока при большом амплитудном значении плотности  $10^5 \text{ А/мм}^2$  и длительности  $10^{-4} \text{ с}$  наиболее эффективно, так как он оказывает пластифицирующее действие на металл в очаге деформации с передачей импульсов силы и энергии.

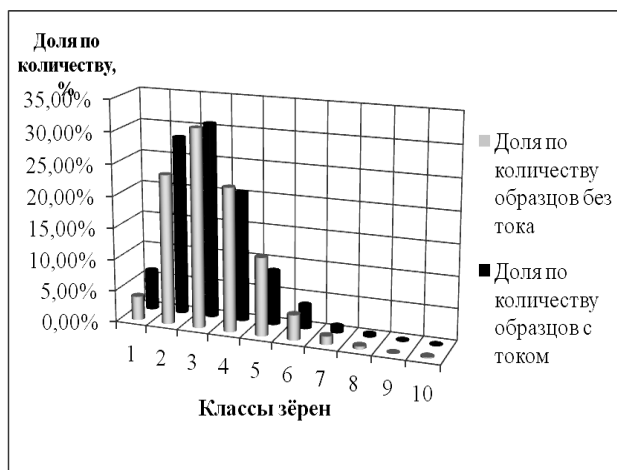
Деформационные микроструктурные характеристики образцов алюминиевой проволоки, деформированных с током и без тока по различным параметрам, показали существенную зависимость микроструктуры от внешних энергетических воздействий при электропластическом волочении (рисунок 1).



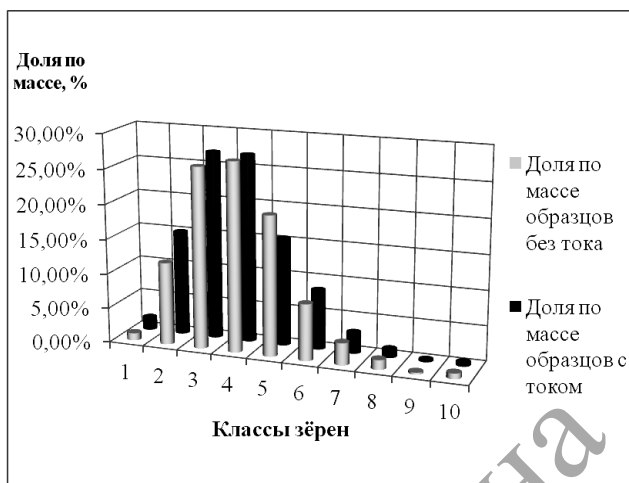
Рисунок 1. – Морфология образцов алюминиевой проволоки без тока (а) и с током (б) (1500х)

Анализы расчётов по параметрам площади, эквивалентному диаметру, периметру, фактору формы, горизонтальному диаметру Мартина показали существенное влияние импульсов тока на деформационные процессы в алюминии и созданием мелкозернистой микроструктуры в образцах, прошедших электропластическую обработку.

На рисунке 2–3 представлены гистограммы распределения периметра зёрен по количеству и массе по классам.



**Рисунок 2. – Распределение периметра зёрен по количеству**



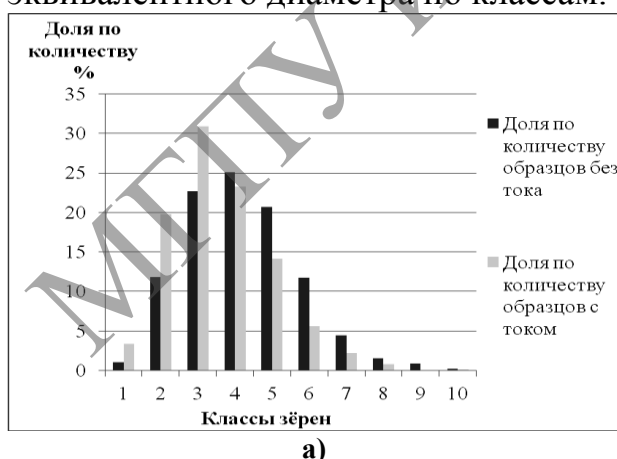
**Рисунок 3. – Распределение периметра зёрен по массе**

Из рисунка 2 видно, что максимальное количество зёрен в образце без тока принадлежит классам, находящимся на интервале от 2 до 4 (3,38–5,61 мкм), а на образце, прошедшем электропластическое деформирование с током (2,47–4,13 мкм).

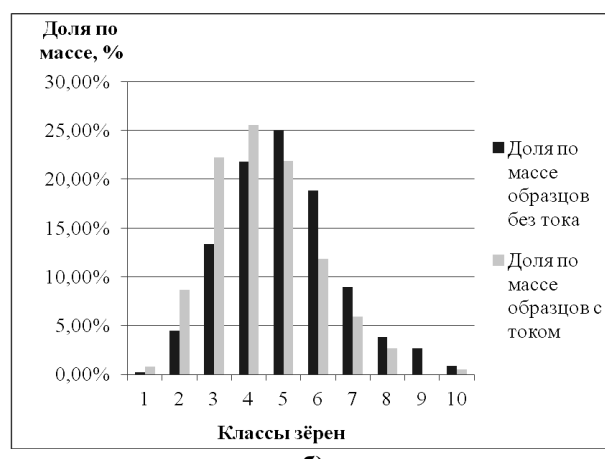
Из рисунка 3 видно, что максимальное количество зёрен на образце без тока принадлежит классам, лежащим на интервале от 2 до 5 (3,38–6,73 мкм.), а на образце с током принадлежит классам, в интервале от 2 до 5 (2,47–4,96 мкм.).

На образце с током количество и масса зёрен 2-го и 3-го классов (мелкие по периметру) больше, чем у образца без тока, что свидетельствует об уменьшении периметра зёрен на образце с током и создании мелкозернистой структуры под воздействием электропластического деформирования.

На рисунке 4 представлены гистограммы распределения эквивалентного диаметра по классам.



а)



б)

**Рисунок 4. – Распределение эквивалентного диаметра зёрен: а) по количеству; б) по массе**

Из рисунка 4(а) видно, что максимальное количество зёрен на образце без тока принадлежит классам, лежащим на интервале от 2 до 5 (0,80–1,49 мкм),

также и на образце, прошедшем электропластическое деформирование с током (0,62–1,21 мкм). Также на рисунке 4(б) видно, что наибольшая доля по массе зерен на образце без тока принадлежит классам, лежащим на интервале от 2 до 7 (0,80–1,94 мкм), также и на образце, прошедшем электропластическое деформирование с током (0,62–1,60 мкм). На образце с током количество зерен 2-го и 3-го классов (самых мелких по диаметру) больше, чем у образца без тока, что свидетельствует об измельчении зерен на образце с током.

Таким образом, при волочении с пропусканием импульсов электрического тока большой плотности через зону деформации в образце алюминия изменяется кинетика пластической деформации, и соответственно, физико-механические характеристики алюминиевой проволоки. Микроструктура деформированного алюминия становится более мелкозернистой с появлением зон рекристаллизации, увеличивается количество субзерен.

Основным эффектом, связанным с уменьшением размера зерна, является улучшение прочностных свойств алюминиевой электротехнической проволоки (повышение пределов текучести и прочности).

Для больших зерен рост прочности и твердости при уменьшении их размера обусловлен введением дополнительных границ зерен, которые являются препятствиями для движения дислокаций.

Так как твердость характеризует сопротивление материала пластической деформации при вдавливании в него более твердого тела, например, алмаза, то существует пропорциональная связь между твердостью и пределом текучести материала ( $\sigma_y$ ). Предел текучести, определяемый как максимальное напряжение при начале пластического течения материала, чувствителен к изменению микроструктурных параметров и зависит от размера зерен, плотности дислокаций и объемной доли частиц второй фазы. Классическим примером является уравнение Холла-Петча, связывающее предел текучести алюминия с размером зерна.

Предел текучести при изменении среднего размера зерна, воздействию электрического тока и наличии набора препятствий для движения дислокаций определяется соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{-n} \quad (1)$$

где  $d$  – средний размер зерна, полученный в ходе исследования (0,00565 мм для образца без тока и 0,004127 для образца с током);

$\sigma_0$  – сопротивление движению дислокаций в монокристалле;

$k$  – коэффициент Холла-Петча.

Для алюминия  $\sigma_0 = 10 \text{ МПа}$ ,  $k = 0,06 \text{ МПа} \times \text{м}^{\frac{1}{2}}$ , величина  $n$  изменяется от 1/2 (классический закон Холла-Петча) до значений, лежащих в интервале 1/4–1. Считается, что каждому значению показателя степени  $n$  соответствует характерный механизм взаимодействия дислокаций с границами зерен. При размерах зерен, превышающих  $10^{-6}$  м, для металлов и сплавов наблюдается достаточно хорошее выполнение классического закона с показателем  $n = 1/2$ .

Для образца с током показатель имеет значение 39,535 МПа, а для образца без тока составляет 35,242 МПа.

Как любой дефект, граница зерна является барьером на пути дислокации из одного зерна в другое. И, следовательно, способствует упрочнению. Упрочнение, даваемое границами, можно рассчитать по формуле Холла-Петча:

$$\Delta\sigma_3 = k_y d^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_3$  – зернограницное упрочнение, МПа;

$d$  – средний размер зерна, м;

$k_y$  – коэффициент, определяемый для данной стали или сплава, 12 МПа.

Из формулы видно, что чем меньше зерно, тем больше значение упрочняющего фактора.

Для образца с током показатель зернограницного упрочнения составляет 29,535 МПа, а образца без тока – 25,242 МПа.

Предел текучести коррелирует с характеристикой конструкционной прочности временным сопротивлением разрыву:

$$\sigma_B = 1,316 \cdot \sigma_T \quad (3)$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву, МПа;

$\sigma_T$  – предел текучести, МПа.

Для образца с током данный показатель составляет 38,868 МПа, а образца без тока – 33,218 МПа.

Полученные результаты морфологического анализа микроструктуры алюминия и проведенных расчетов по формуле Холла-Петча коррелируют с проведенными исследованиями и показали существенное влияние электропластической деформации при пропускании импульсов тока в зоне многопереходной прокатки деформационного алюминия, нагруженного выше предела текучести на микрозеренную структуру образцов и модификацию их свойств.

При электропластическом деформировании волочением происходит дробление зерен с уменьшением их фрагментации. Импульс электрического тока большой плотности, который проходит через деформационное поле алюминиевой проволоки во время волочения, приводит к повышению пластичности зоны деформации, зерна в большей степени деформируются и приобретают неравноосную форму, увеличивается доля межзеренных границ.

Повышение пластичности деформационного алюминия в условиях электропластичности улучшает его обрабатываемость, способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности, снижает усилия деформации, энергопотребление, улучшает служебные, электротехнические и механические характеристики.

Таким образом, наложение импульсного тока на зону деформации во время электропластического волочения приводит к изменению



деформационных процессов и, как следствие, влияет на физико-механические характеристики алюминиевой проволоки после деформации, что приводит к уменьшению металлоемкости изделия, сокращению энергетических затрат в технологическом процессе.

Исследована микротвёрдость при локально-контактном деформировании образцов диаметром от 2,48–5 мм из электротехнической алюминиевой проволоки АКЛП-5ПТ при реализации деформации волочением без тока и симпульсным током, пропущенным через зону деформации АКЛП-5ПТ плотностью  $10^3$ – $10^4$  А/мм<sup>2</sup>, длительностью  $10^{-5}$ с в условиях многопереходной прокатки (ЭПД) (рисунок 5).

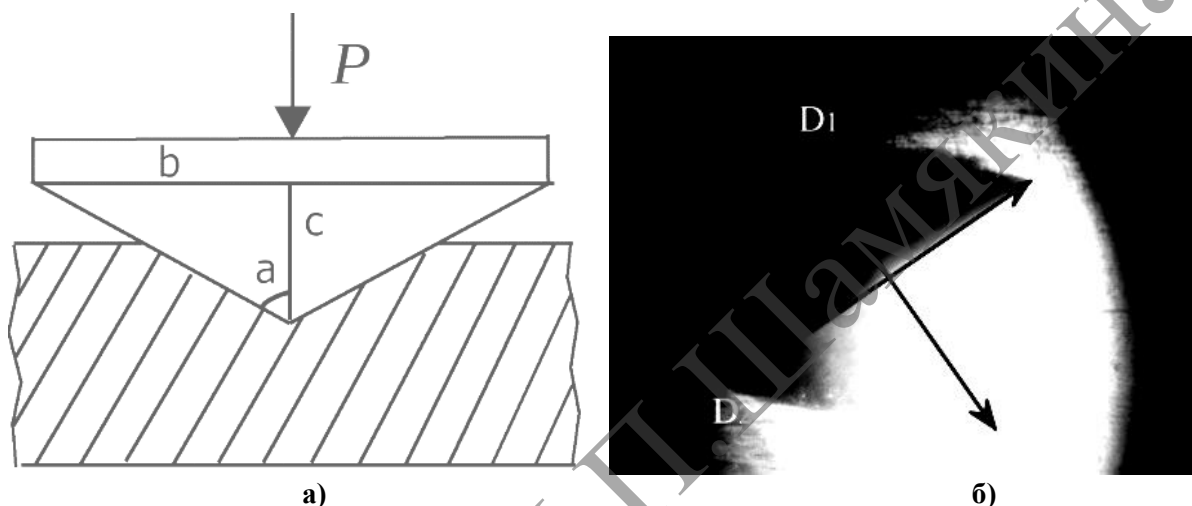


Рисунок 5. – Модель измерения микротвёрдости (а) и микрофотография отпечатка после вдавливания (б) при измерении микротвердости с использованием четырехгранной пирамиды Виккерса (500<sup>x</sup>)

Для определения глубины отпечатка использовались значения проекции ширины отпечатка и тангенс половины угла при вершине пирамиды (рис. 5(а)):

$$c = \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (4)$$

где  $c$  – глубина отпечатка, мкм;

$\alpha$  – половина угла при вершине пирамиды Виккерса ( $68^\circ$ );

$b$  – половина ширины отпечатка, мкм.

Микротвердость по Виккерсу равнялась:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

Полученные результаты измерения микротвёрдости сведены в таблицу 1 для образца без тока и таблицу 2 для образца с током.

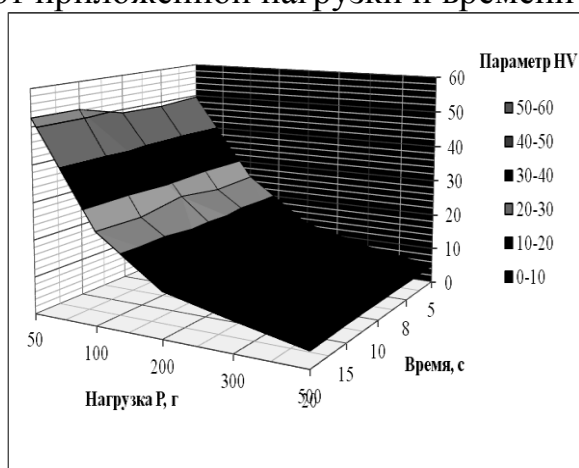
Таблица 1. – Результаты измерений образца без тока

Нагрузка, Р	Время, с	D1	D2	Параметры твёрдости, HV			Среднее значение показателя твёрдости, HV
50	5	44,09	44,09	47,7	52,2	48,6	49,5
		42,16	42,16				
		43,68	43,68				
	8	43,18	43,18	49,7	49,6	46,7	48,7
		43,23	43,23				
		44,58	44,58				
	10	45,12	45,12	45,5	52,1	49,4	49
		42,19	42,19				
		43,34	43,34				
	15	42,11	42,11	52,3	53,3	51,2	52,27
		41,69	41,69				
		42,56	42,56				
20	41,93	41,93	52,7	53,9	50,3	52,3	
	41,48	41,48					
	42,91	42,91					
100	5	61,20	61,20	24,8	25,6	25,3	25,23
		60,16	60,16				
		60,54	60,54				
	8	61,40	61,40	24,6	23,8	25,9	24,77
		62,38	62,38				
		59,86	59,86				
	10	58,41	58,41	27,2	26,3	25,6	26,37
		59,35	59,35				
		60,18	60,18				
	15	61,61	61,61	24,4	24,5	24,2	24,37
		61,5	61,5				
		61,84	61,84				
	20	60,51	60,51	25,3	24,3	24,6	24,73
		61,77	61,77				
		61,40	61,40				
200	5	87	87	12,2	12,1	13,3	12,53
		87,58	87,58				
		83,34	83,34				
	8	85,64	85,64	12,6	12,7	12,9	12,73
		83,93	87,05				
		84,63	84,63				
	10	87,81	87,81	12	11,8	12,1	11,97
		88,75	88,75				
		87,52	87,52				
	15	84,56	84,56	13	12,7	12,5	12,73
		83,36	87,44				
		86,19	86,19				
	20	87,85	87,85	12	12,3	12,5	12,27
		86,69	86,69				
		86,27	86,27				
105,2		105,2					
104,1		104,1					

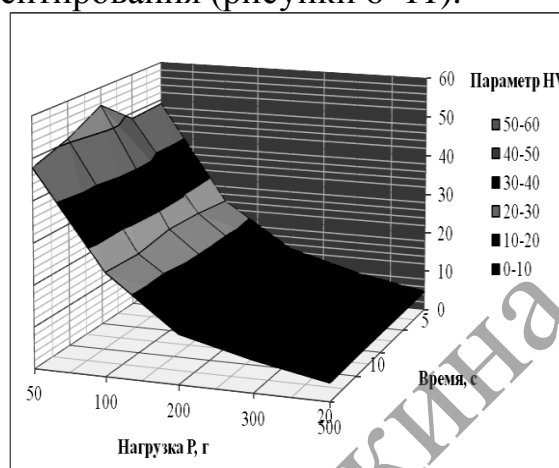
Таблица 2. – Результаты измерений образца с током

Нагрузка, Р	Время, с	D1	D2	Параметры твёрдости, HV			Среднее значение показателя твёрдости, HV
50	5	43,48	43,48	49	48,2	49,7	48,97
		43,85	43,85				
		43,20	43,20				
	8	44,54	44,54	46,7	49,1	49,9	48,57
		43,44	43,44				
		42,81	43,38				
	10	39,99	39,99	58	60,1	48,3	55,47
		39,27	39,27				
		43,81	43,81				
	15	44,06	44,06	47,8	51,6	53,1	50,83
		42,41	42,41				
		41,79	41,79				
20	43,93	43,93	48,1	47,3	48	47,8	
	44,27	44,27					
	43,97	43,97					
100	5	59,81	59,81	25,9	23,8	22,7	24,13
		62,36	62,36				
		63,94	63,94				
	8	60,23	60,23	25,6	24,1	26	25,23
		61,98	61,98				
		59,69	59,69				
	10	61,68	61,68	24,4	26,2	26,4	25,67
		59,47	59,47				
		59,26	59,26				
	15	64	64	22,6	24,7	25,4	24,23
		61,26	61,26				
		60,45	60,45				
20	59,94	59,94	25,8	24,2	24	24,67	
	61,93	61,93					
	61,14	63,26					
200	5	83,2	83,2	13,4	12,8	12,5	12,9
		85,2	85,2				
		85,98	85,98				
	8	85,13	85,13	12,8	12,7	11,8	12,43
		85,56	85,56				
		88,6	88,6				
	10	88,81	88,81	11,8	13,3	12,2	12,43
		83,42	83,42				
		87,02	87,02				
	15	87,62	87,62	12,1	12,2	12,9	12,4
		87,23	87,23				
		84,75	84,75				
20	89,17	89,17	11,7	11,9	12,2	11,93	
	88,09	88,09					
	87,11	87,11					
	109	109					
		110,1	110,1				

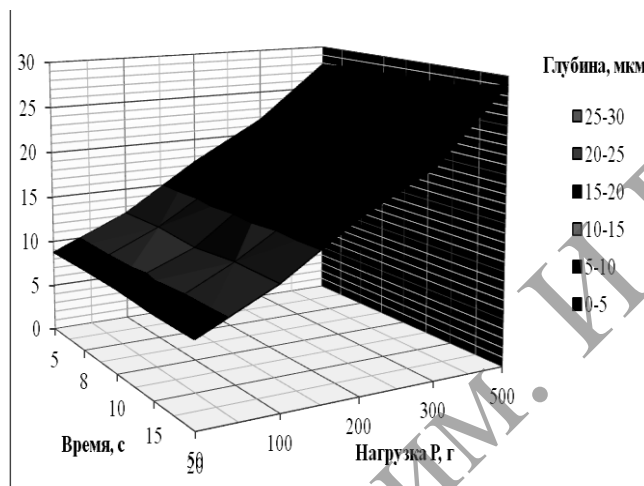
По данным таблиц 1 и 2 и расчетов по формуле 4 представлены графики зависимости глубины отпечатка и параметра микротвердости HV от приложенной нагрузки и времени индентирования (рисунки 6–11).



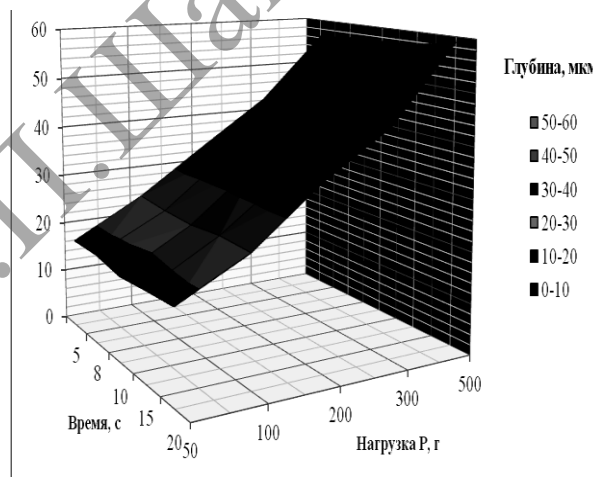
**Рисунок 6. – Микротвердость образца алюминия без тока**



**Рисунок 7. – Микротвердость образца алюминия с током**



**Рисунок 8. – Глубина отпечатка образца алюминия с током**



**Рисунок 9. – Глубина отпечатка образца алюминия с током**

Анализ значений микротвердости (рисунки 6–7) и глубины отпечатка пирамиды (рисунки 8–9) показал существенное влияние импульсов тока на процессы электропластичности образцов деформированного алюминия.

Из рисунков 6–9 видно, что при воздействии импульсов электрического тока во время деформации волочением среднее значение показателя микротвердости увеличивается.

Реализация ЭПДМ волочением существенно модифицирует микроструктуру материала с созданием мелкозернистости, что приводит к увеличению микротвёрдости и увеличению пластичности.

В соответствии с полученными экспериментальными данными установлено влияние размера зерен на микротвердость. На образце без тока при среднем размере зерна  $d_m = 5,65$  мкм, среднее значение показателя микротвёрдости по Виккерсу составляет 19,262 HV, а на образце с током при

$d_m = 4,127$  мкм микротвердость составляет 20,02 HV, что свидетельствует об увеличении микротвердости при уменьшении размера зерна.

В соответствии с рисунками 8–9 средняя глубина отпечатка, имеющая линейную зависимость со средним диаметром отпечатка  $d$ , на образце с током больше, чем на образце без тока.

В соответствии с формулой расчета эффективной деформации, она увеличивается на образце с током:

$$\delta = \frac{0,2d}{D}. \quad (6)$$

Также известна прямая зависимость  $\delta$  и  $\psi$  (деформация уширения в отпечатке), которая является качественным показателем пластичности.

При воздействии электрического тока на образец повышается его пластичность, что коррелирует с результатами опытов по повышению механической устойчивости и прочности листовых заготовок из алюминий-магниевого сплава с использованием ЭПДМ (где подавались мощные короткие (100–150 мкс) импульсы тока плотностью 3,5–10 кА/мм<sup>2</sup>). В результате повысилась пластичность металла, снизилось сопротивление металла деформированию, повысилась производительность и качество обработки.

По полученным данным микротвердости исследовано контактное нагружение образцов, которое является наиболее распространенным случаем силового взаимодействия деталей машин, узлов, конструкций. Сопротивление материала упругопластической контактной деформации является одним из важнейших факторов, определяющих условия трения и износа деталей машин. Одним из параметров, определяющих величину деформационной составляющей внешнего трения, является величина гистерезисных потерь, возникающих в деформированном металле.

Величиной, характеризующей гистерезисные потери в материале при локальном контактом нагружении, является обратимая неупругая (релаксационная) деформация при повторных нагружениях в отпечатке  $\varepsilon_\delta$ , которая наряду с упругой деформацией является одним из параметров материала, характеризующим его структуру и стойкость к усталостному разрушению.

Обратимую неупругую деформацию можно найти из общей деформации:

$$\varepsilon_\delta = \frac{k\delta h_d}{F_0} = \frac{2\delta}{h_d} \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\delta$  – эффективная деформация ( $\delta = \frac{0,2d}{D}$ )

$h_d$  – глубина отпечатка, мкм;

$F_0$  – величина проекции отпечатка;

$\varepsilon$  – величина общей деформации будет равна:

$$\varepsilon = \frac{k}{2} \times \frac{h_d^2}{F_0}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от типа индентора (для пирамиды  $k=4$ ).

В свою очередь еще одним важным показателем является упругая деформация, которая также может возникать в материалах. Она рассчитывается по следующей формуле:

$$\varepsilon_\delta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{w_1}{\sqrt{F_0}}, \quad (8)$$

где  $w_1$  – величина упругого сближения, будет равна:

$$\frac{w_1}{\sqrt{F_0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{HM}{E^*}, \quad (9)$$

где  $\frac{HM}{E}$  – постоянные значения физико механических свойств материала.

Полагая, что отличие расчётной величины упругого сближения  $w_0$  от величины упругого восстановления пластического отпечатка  $w_1$  вызвано различием распределения давления по площади нагружения, примем, что  $w_1 = w_0/q$ , где  $q=1 \dots 2$  – показатель распределения по площади нагружения (при упругом вдавливании плоского штампа  $q=1$ , конического  $q=2$ , сферического  $q=1,5$ ).

Принимая площадь упругого контакта равной площади проекции  $F_0$  пластического отпечатка, запишем соотношение  $F_0 = \frac{\pi d_u^2}{4}$  (где  $d_u$  – диаметр площади упругого контакта), из которого получим  $d_u = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}}$ .

Для определения  $w_0$ , примем формулу (10):

$$w_0 = 0,25\pi d_u \operatorname{ctg} \varphi, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – угол заточки индентора.

Для определения  $HM$  (твёрдости по Мейеру), можно использовать выражение из:

$$HM = \frac{P_m}{A}, \quad (11)$$

где  $P_m$  – максимальная нагрузка;

$A$  – площадь проекции контакта.

Полученные результаты расчета упругой и обратимой неупругой (релаксационной) деформации для образцов с током и без тока сведены в таблицу 3.

Таблица 3. – Расчетные значения упругой и обратимой неупругой деформации материала

Нагрузка, Р	Время, с	Неупругая деформация, $\epsilon_{\delta}$		Упругая деформация, $\epsilon_{\delta}$	
		Без тока	С током	Без тока	С током
50	5	3,465	3,497	0,202	0,202
	8	3,521	3,526	0,202	0,202
	10	3,503	3,108	0,202	0,202
	15	3,277	3,376	0,202	0,202
	20	3,275	3,586	0,202	0,202
100	5	3,395	3,555	0,202	0,202
	8	3,46	3,395	0,202	0,202
	10	3,249	3,34	0,202	0,202
	15	3,51	3,539	0,202	0,202
	20	3,462	3,477	0,202	0,202
200	5	3,413	3,32	0,202	0,202
	8	3,356	3,449	0,202	0,202
	10	3,578	3,449	0,202	0,202
	15	3,366	3,457	0,202	0,202
	20	3,49	3,586	0,202	0,202
	20	3,846	3,932	0,202	0,202

По данным таблицы 3 построены графики зависимости обратимой неупругой деформации от приложенной нагрузки и времени индентирования на образцах без тока (рисунок 10) и с током (рисунок 11), а также зависимости упругой деформации от аналогичных параметров (рисунок 12).

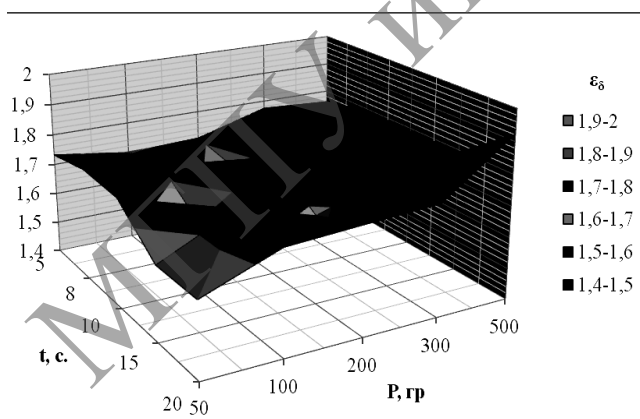


Рисунок 10. – Обратимая неупругая деформация на образце алюминия без тока

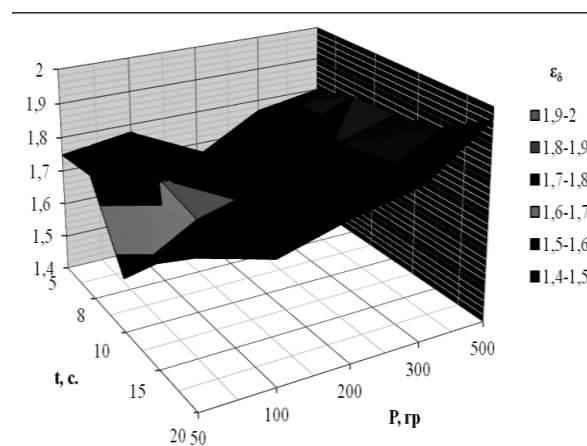
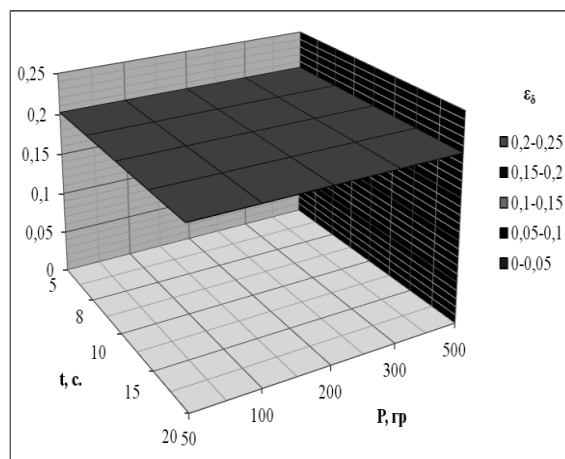


Рисунок 11. – Обратимая неупругая деформация на образце алюминия с током



**Рисунок 12. – Обратимая упругая деформация на образце алюминия с током и без тока**

Также по полученным данным можно дать оценку характера циклического деформационного упрочнения исследуемого материала.

Склонность к циклическому упрочнению или разупрочнению определяется соотношением:

$$P = \frac{\sigma_B}{\sigma_T}, \quad (12)$$

где  $\sigma_B$  – предел выносливости;

$\sigma_T$  – предел текучести.

Данный коэффициент равен примерно 0,983, что свидетельствует о том, что материал является пластичным.

Из рисунков 10–12 видно, что в образце с током величина обратимой неупругой (релаксационной) деформации в общем увеличивается, и коэффициент циклического упрочнения меньше 1, 2, что свидетельствует об увеличении пластичности образца. В образцах с током и без тока упругая деформация остаётся постоянной, что свидетельствует о крайне малом восстановлении отпечатка под влиянием упругих сил. Таким образом, под действием сосредоточения нагрузки при контактном деформировании происходит незначительное обратимое смещение атомов, что соответствует поверхностному деформационному наклёпу при электропластическом деформировании волочением.



## 9.2. Расчет пондеромоторных факторов в условиях электропластичности. Математическое моделирование процессов электропластической деформации и их графическое изображение в математическом пакете Matlab

В настоящее время математический пакет Matlab – один из наиболее используемых вычислительных средств, применяемый во многих областях науки. К тому же Matlab имеет свой собственный язык программирования. В этом плане пакет Matlab является самым удобным и предпочтительным.

Недостатками данного пакета можно назвать: неполную поддержку статистических функций, работа с большим количеством окон, довольно обширную и не очень внятную справочную систему. В любом случае, для корректного решения задач линейного программирования Matlab идеально подходит и хорошо с этим справляется.

В MatLab важная роль отводится специальным подпрограммам – Toolboxes, которая служит эффективным средством для решения различного рода линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, а также системных дифференциальных уравнений в частных производных с большим числом переменных, решение которых аналитически невозможно или очень затруднительно и позволяет визуализировать процессы, происходящие во времени и пространстве с использованием функции *plot3*.

После всех этих действий можно переходить непосредственно к расчетам, и задавая нужные параметры, смотреть распределение различных характеристик.

Воздействие собственного магнитного поля тока обуславливает поляризацию электронной плазмы металла и, как следствие, появление поперечного электрического поля Холла.

Пусть  $H_m(x,t)$  – собственное магнитное поле в образце. Рассмотрим уравнение вида:

$$H_m(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x,x',t) f(x') dx', \quad (13)$$

$$\text{где } G(x,x',t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{4Dt}\right].$$

Перепишем (13) в виде:

$$H_m(x,t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^{\infty} \left\{ f(x') \exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{4Dt}\right] + f(-x') \exp\left[-\frac{(x'+x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (14)$$

Удовлетворяя граничному условию, будем иметь:

$$H_m(0,t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x'^2}{4Dt}\right] \cdot \{f(x') - f(-x')\} dx'. \quad (15)$$

Условие будет выполнено, если  $f(-x') = -f(x')$  ( $0 \leq x' \leq \infty$ ).

Подставим (15), с учётом условия, в (14) и получим:

$$H_m(x,t) = (4\pi Dt)^{-1/2} \int_0^\infty f(x') \left\{ \exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{4Dt}\right] - \exp\left[-\frac{(x'+x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (16)$$

Подставим (15) в (16) и получим:

$$H_m(x,t) = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_0^\infty \left\{ \exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{4Dt}\right] - \exp\left[-\frac{(x'+x)^2}{4Dt}\right] \right\} dx'. \quad (17)$$

Разобьём интеграл на два слагаемых и введём новые переменные интегрирования:

$$\alpha = \frac{x' - x}{\sqrt{4Dt}} \quad \beta = \frac{x' + x}{\sqrt{4Dt}}, \quad (18)$$

получим

$$\begin{aligned} H_m(x,t) &= \frac{H_0}{\sqrt{\pi}} \left[ \int_x^\infty \frac{e^{-\alpha^2}}{\sqrt{4\pi Dt}} d\alpha - \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\sqrt{4\pi Dt}} d\beta \right] = \\ &= \frac{H_0}{\sqrt{\pi}} = \frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_x^\infty e^{-\alpha^2} d\alpha = \frac{2H_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}} e^{-\alpha^2} d\alpha, \end{aligned}$$

или

$$H_m(x,t) = H_0 \theta\left(\frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}}\right), \quad (19)$$

где  $\theta(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\alpha$ .

Тогда (19) – вещественное магнитное поле в образце.

Напряженность собственного магнитного поля  $\vec{H}$ . Пусть  $r$  – сечение образца, в котором определяется напряженность поля. Выделим элементарный участок  $d\vec{l}$ , и положим что для всех элементарных участков импульсный ток имеет одно значение, то есть полная напряженность магнитного поля  $\vec{H}$ :

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} I \int \frac{\sin \alpha}{r^2} d\vec{l}. \quad (20)$$

Из (20) следует

$$\frac{d\vec{l}}{r^2} = \frac{d\vec{\alpha}}{r \sin \alpha}, \quad (21)$$

но учитывая  $r \sin \alpha = R$  получим:

$$\frac{d\vec{l}}{r^2} = \frac{d\vec{\alpha}}{R}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) формулу (21) и переходя к интегрированию по углу  $\alpha$  в пределах от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ :

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin \alpha}{R} d\vec{\alpha} = \frac{1}{4\pi R} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \cdot d\vec{\alpha} = -\frac{1}{4\pi R} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (23)$$

что в итоге

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi R} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1). \quad (24)$$

Электромагнитное поле для неподвижных тел описывается системой уравнений Максвелла, законом Ома и уравнениями связи т.к. ток изменяется по гармоническому закону. С учетом  $i = \int \vec{j} dS$ ,  $H$  также изменяется гармонически:

$$H = \int dH_r. \quad (25)$$

Согласно (25),

$$dH_r = dH \cos \theta = \frac{R}{r} dH. \quad (26)$$

Используя закон Био-Савара-Лапласа, получим:

$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (27)$$

или

$$dH_r = \frac{IRdl}{4\pi r^3}. \quad (28)$$

Подставляя последнее выражение в формулу (27):

$$\vec{H}_0 = \frac{IR}{4\pi r^3} \int d\vec{l} = \frac{IRdl}{4\pi r^3}. \quad (29)$$

Наконец, подставляя (29) в (19), мы получим значение напряжённости магнитного поля в образце:

$$\vec{H} = \frac{IRdl}{4\pi r^3} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\alpha^2} d\vec{\alpha} \left( \frac{x}{\sqrt{4\pi Dt}} \right). \quad (30)$$

Рассчитаем плотность тока  $j$  в образце. В данном случае импульсный ток в образце имеет только одну направляющую  $A_x(y,z)$ ,  $I_y=0$ ,  $I_z=0$ . Тогда можно использовать решения для потенциала собственного магнитного поля в трех областях. Для верхней:

$$\vec{A}_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{-\lambda|z-h|} + \vec{j}_1 e^{-\lambda|z+h|} \right) \frac{e^{2j\lambda y}}{\lambda} d\lambda. \quad (31)$$

Для второй области:

$$\vec{A}_2 = \frac{\mu_0 \mu_2 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (e^{q_2 z} + \vec{j}_2 e^{-q_2 z}) \frac{e^{\lambda(2jy-h)}}{\lambda} d\lambda. \quad (32)$$

Для нижней:

$$\vec{A}_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{j}_3 \frac{e^{\lambda(2jy+z-h)}}{\lambda} d\lambda. \quad (33)$$

Решение уравнений (31–33) возможно с учетом:

$$k^2 = -J\sigma\omega\mu_0 \quad q^2 = \lambda^2 - k^2; \quad (34)$$

$$\vec{J}_1 = \frac{(\lambda^2 \mu_2^2 - q_2^2)(e^{q_2 T} - e^{-q_2 T})}{(\lambda \mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda \mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}, \quad (35)$$

$$\vec{J}_2 = \frac{2q_2(q_2 - \lambda \mu_2)e^{-q_2 T} + 2q_2(q_2 + \lambda \mu_2)e^{q_2 T}}{(\lambda \mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda \mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}, \quad (36)$$

$$\vec{J}_3 = \frac{4\lambda q_2 \mu_2 e^{\lambda T}}{(\lambda \mu_2 + q_2)^2 e^{q_2 T} - (\lambda \mu_2 - q_2)^2 e^{-q_2 T}}. \quad (37)$$

Плотность токов можно определить через потенциал:

$$\vec{j} = -J\sigma\omega A_2. \quad (38)$$

Как видно из уравнений (31–38), основными параметрами, определяющими формирование токов, являются магнитная проницаемость, электрическая проводимость материала образца и частота тока.

Расчет в математическом пакете Matlab с исходными данными для поставленной задачи (рисунок 13).

```

Editor - D:\RAS4ET_MP.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 % исходные данные
2 - c = 3*10^10; % см/с, электродинамическая постоянная
3 - si = 3.7*10^7; % Ом/м, удельная проводимость алюминия
4 - m = 1.2566*10^(-6); % Н/А^2, магнитная постоянная для алюминия
5 - j = 10^3; % А/мм^2, плотность тока
6 - S = 4; % мм^2, площадь поперечного сечения проводника
7 - r1 = 0.4; % мм, радиус образца #1
8 - r2 = 1.9; % мм, радиус образца #2
9 - t = 10^(-4); % с, длительность импульсов тока
10 - w1 = 500; % Гц, частота следования импульсов #1
11 - w2 = 700; % Гц, частота следования импульсов #2
12 - w3 = 900; % Гц, частота следования импульсов #3
13 - DM % коэффициент магнитной диффузии
14 - Hz(x,t) % значение магнитного поля в образце
script Ln 18 Col 54 OVR

```

Рисунок 13. – Исходные данные для решения задачи

Рассмотрим уравнение, которое согласуется с уравнением диффузии, выбрав проекцию на ось Z. (рисунок 14). Так как поле вне образца изменяется по гармоническому закону, следующая Z-проекция магнитного

поля образца будет на границе при  $x=0$ . Гармоническая зависимость определяют скин-эффект в стационарном состоянии.

```

Editor - D:\RAS4ET_MP.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
16 - while diff(n)/diff(t)==D*laplace^2*n
17 - for i=1:n
18 -     diff(H)/diff(t)==(c^2./4*pi*si*m).*laplace^2*H;
19 -     for j=1:n
20 -         while DM==(c^2)/(4*pi*si*m)
21 -             if (i==j)
22 -                 diff(Hz)/diff(t)==DM.*(diff^2)*Hz./diff(x^2);
23 -             end
24 -         end
25 -     end;
26 -     x=0;
27 -     for i=1:n
28 -         Hz(0,t)=Ho.*cos(wt);
29 -     end;
script Ln 29 Col 5 OVR

```

Рисунок 14. – Постановка исходной задачи

Поскольку уравнение линейно и содержит вещественные коэффициенты, то следующие выкладки можно упростить, перейдя к комплексной записи. Таким образом, будем искать решение другой вспомогательной задачи с заменой  $\cos(\omega t)$  на комплексную экспоненту. Решение исходной задачи с вещественным полем можно получить из решения вспомогательной задачи с комплексным полем путём отделения вещественной части.

```

Editor - D:\RAS4ET_MP.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
31 - x=0;
32 - while cos(wt)
33 -     for i=1:n
34 -         Hz(0,t)=Ho.*exp^-(iwt);
35 -     end;
36 - end;
37 - max=x;
38 - for i=1:n
39 -     for x=1:n
40 -         Hz(x,t)=H(x).*exp^-(iwt);
41 -     end
42 - end;
43 - for i=1:n
44 -     if max==x
45 -         (diff^2*H)./(diff(x^2))==(2*i)./(bi^2)*H;
46 -     end
47 - end;
...
script Ln 29 Col 5 OVR

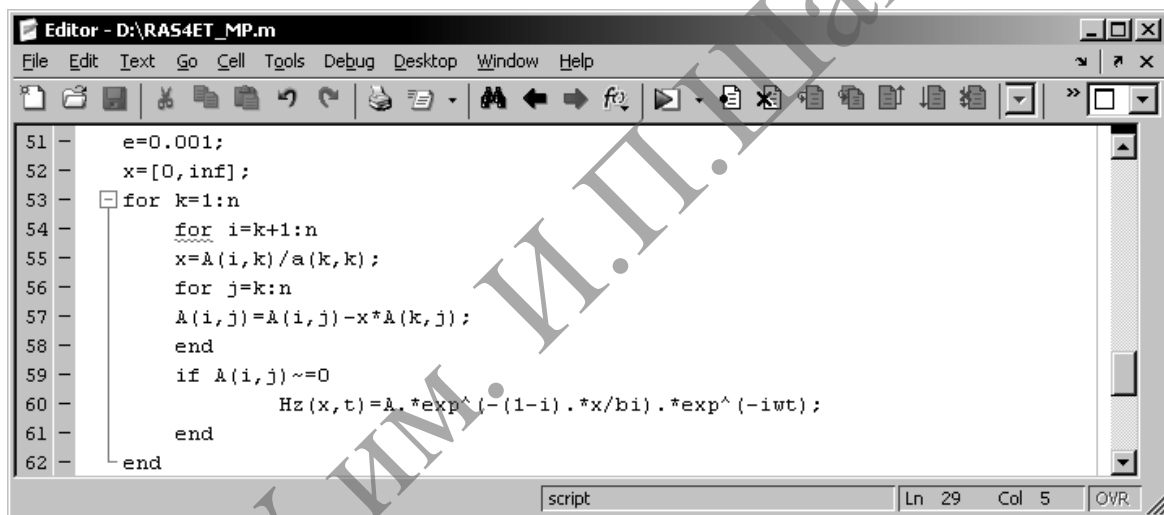
```

Рисунок 15. – Решение исходной задачи с вещественным полем

Поскольку магнитное поле вне образца пропорционально  $e^{-i\omega t}$ , предположим, что решение вспомогательной задачи следует искать в виде, показанном на рисунке 15. Подставляя эту зависимость в уравнение

с частными производными, можно получить обыкновенное дифференциальное уравнение.

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами находится в виде суммы экспонент  $Ae^{ikx}$  с постоянными коэффициентами  $A$  и  $k^2$ . Коэффициент  $k$  находится подстановкой  $e^{ikx}$  в исходное уравнение. Получившееся алгебраическое уравнение  $k^2 = \frac{2i}{\delta^2}$  имеет два корня  $k_{\pm} = \frac{1+i}{\delta}$ . Один из них  $k_+$  отвечает убывающему, а другой  $k_-$  – нарастающему в глубь образца (при  $x \rightarrow \infty$ ) переменному магнитному полю. Нарастающее в глубь образца магнитное поле следует опустить, так как оно отвечает бессмысленному увеличению магнитного поля вплоть до бесконечного значения при удалении от источника. Таким образом, внутри проводника решение вспомогательной задачи имеет вид, как показано на рисунке 16.



```

Editor - D:\RAS4ET_MP.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
51 - e=0.001;
52 - x=[0, inf];
53 - for k=1:n
54 -     for i=k+1:n
55 -         x=A(i,k)/a(k,k);
56 -         for j=k:n
57 -             A(i,j)=A(i,j)-x*A(k,j);
58 -         end
59 -         if A(i,j)~=0
60 -             Hz(x,t)=A.*exp^(-(1-i).*x/bi).*exp^(-iwt);
61 -         end
62 -     end

```

Рисунок 16. – Решение вспомогательной задачи с вещественным полем

Коэффициент  $A$  можно найти из условия непрерывности тангенциальной проекции напряженности магнитного поля на границе образца при  $x=0$ . Поскольку вне проводника при  $x=0$  напряженность магнитного поля изменяется по закону  $H_z(0,t) = H_0 e^{-i\omega t}$ , заключаем, что  $A=H_0$ . Определяя вещественную часть комплексной функции, найдем вещественное магнитное поле в образце (рисунок 17).

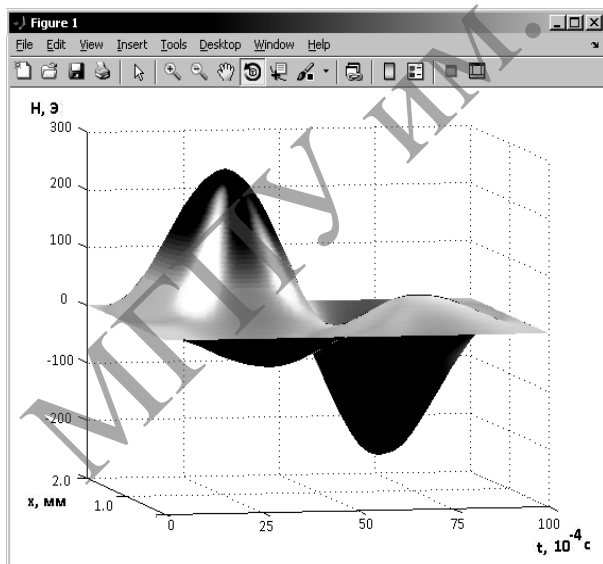
```

Editor - D:\RAS4ET_MP.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
64 - x=0;
65 - Hz(0,t)=Ho.*exp^(-iwt);
66 - A=Ho;
67 - e=0.001;
68 - for i=n-1:(-1):1
69 -     for j=i+1:n
70 -         if A(i,j)~=0
71 -             Hz(x,t)=Ho.*exp^(-(1-i).*x/bi).*exp^(-iwt);
72 -         end
73 -     end
74 -     Hz(0,t)=Ho.*exp^(-x/bi).*cos(w.*t-(x./bi));
75 - end
script Ln 29 Col 5 OVR

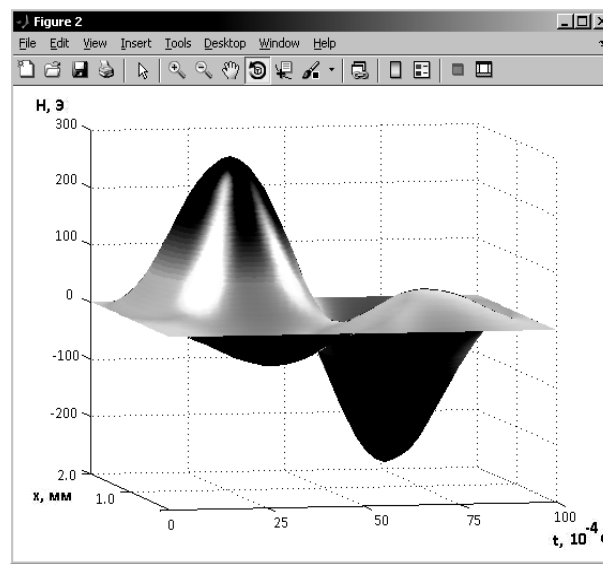
```

Рисунок 17. – Нахождение вещественного магнитного поля  $H_z$

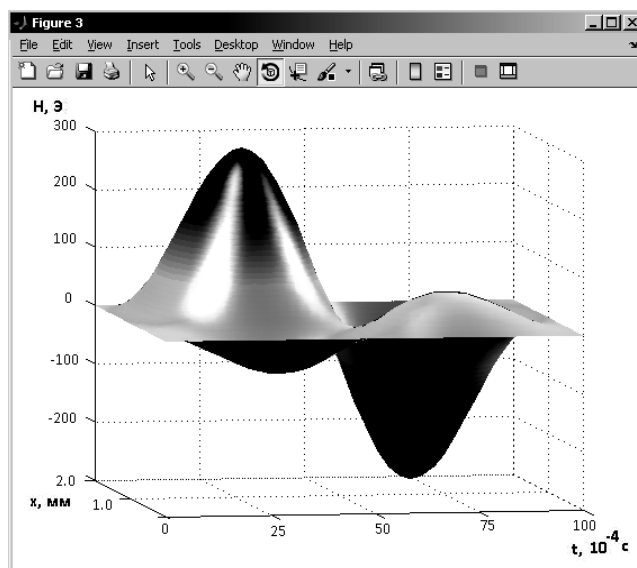
Как видно из графиков (рисунок 18а-в), в образце деформационного алюминия наблюдается изменение магнитного поля, причем при перемещении от центра к поверхности образца напряженность магнитного поля увеличивается и достигает значения 225 Э, на расстоянии в 1 мм от центра поперечного сечения образца напряженность магнитного поля принимает наибольшее значение в 25 Э.



а)



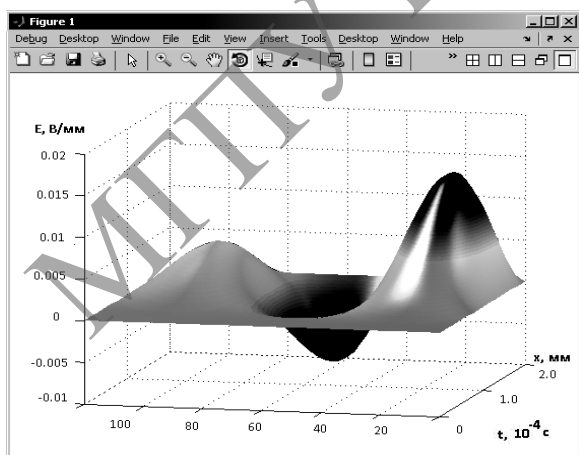
б)



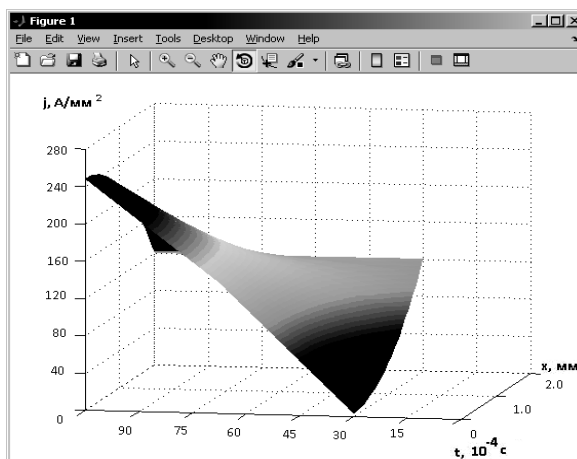
в)

Рисунок 18. – Изменение магнитного поля в образце алюминия при:  
а – 500 Гц; б – 700 Гц; в – 900 Гц

Построение распределения электрического поля и плотности электрического тока при вторичных пондеромоторных факторах в явлении электропластичности деформационного алюминия (рисунок 19) показали, что напряженность электрического поля изменяется от оси к стенкам и достигает максимальной значения  $0,025 \text{ В/мм}$ . на расстоянии в  $1 \text{ мм}$  от центра поперечному сечению образца напряженность электрического поля принимает значение в  $0,01 \text{ В/мм}$ ., Плотность тока будет также неравномерно распределяться по сечению образца. Как видно из рисунка 19.1б, при перемещении от центра к поверхности образца плотность тока увеличивается и достигает максимального значения  $320 \text{ А/мм}^2$ .



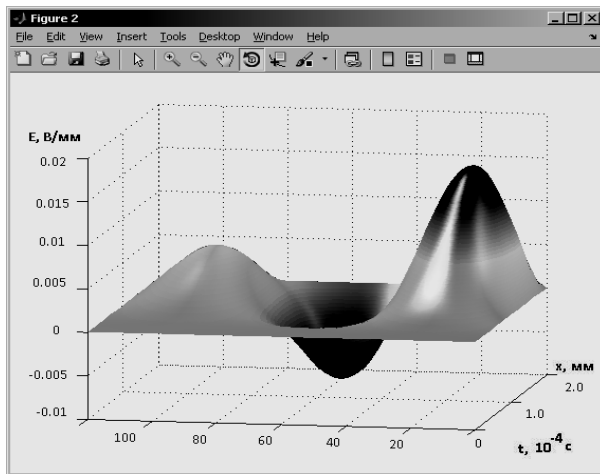
а)



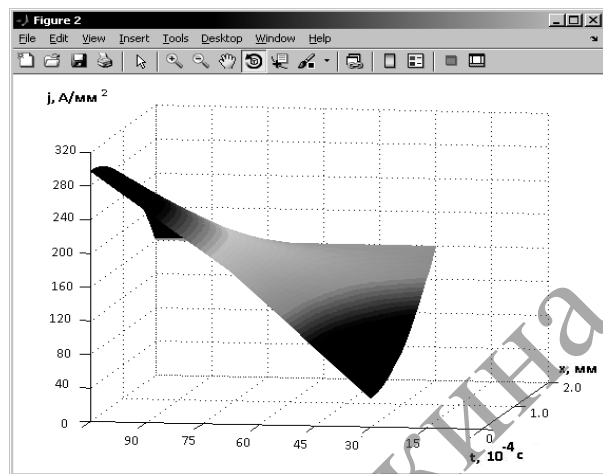
б)

Рисунок 19.1. – Электрическое поле и плотность тока:  
а – распределение электрического поля; б – плотности тока в образце деформационного алюминия в условиях электропластичности при 500 Гц





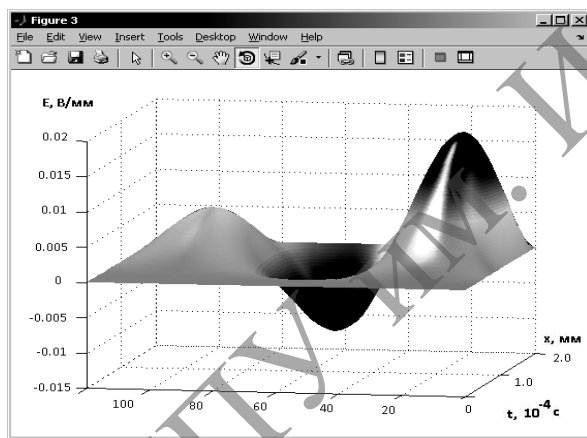
а)



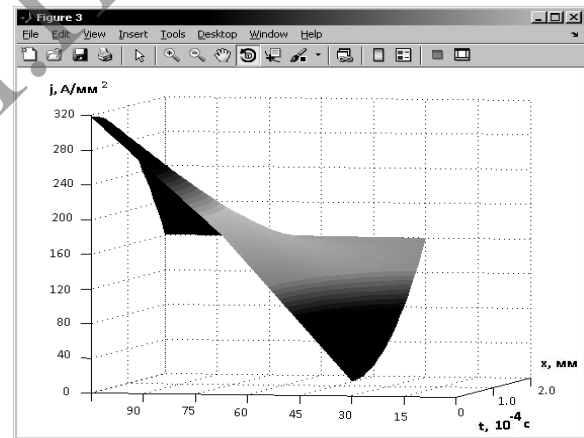
б)

**Рисунок 19.2. – Электрическое поле и плотность тока:**

**а – распределение электрического поля; б – плотности тока в образце деформационного алюминия в условиях электропластичности при 700 Гц**



а)



б)

**а – распределение электрического поля; б – плотности тока в образце деформационного алюминия в условиях электропластичности при 900 Гц**

**Рисунок 19.3. – Электрическое поле и плотность тока**

## Использованная литература:

1. Савенко, В.С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, А.Г. Силивонец // Известия НАН РБ. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
2. Троицкий, О.А. Физические и технологические основы электропластической деформации металлов: монография / О.А. Троицкий, В.В. Савенко. – Мозырь: МГПУ им. И.П. Шамякина, 2016. – 208 с.
3. Bennett, W.H. Magnetically self-focussing streams / W.H. Bennett // Phys. Rev. – 1934. – № 45. – P. 890.
4. Рощупкин, А.М. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.
5. Савенко, В.С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий: монография / В.С. Савенко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск: БГАФК, 2003. – 203 с.
6. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.И. Баранов [и др.]. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
7. Батаронов, И.Л. О механизме влияния электрического тока на пластическую деформацию металлов / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: Тез. докл. 11 Всесоюз. конф. Куйбышев, 1986. – С. 87–88.
8. Батаронов, И.Л. Влияние импульсного электрического тока на динамику плоских дислокационных скоплений в металлах / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: Тез. докл. 12 Всесоюз. конф. Куйбышев, 1989. – С. 86–96.
9. Беляев, А.И. Металловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов: справочное издание. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.: ил.
10. Батаронов, И.Л. Электропластическая деформация металла и динамический пинч-эффект / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин. – Изв. ВУЗов. сер. Черная металлургия. – 1993 – № 8. – С. 54–64.
11. Троицкий, О.А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О.А. Троицкий, В.С. Савенко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.

12. Спицын, В.И. Электропластическая деформация металлов / В.И. Спицын, О.А. Троицкий. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
13. Троицкий, О.А. Влияние электронного состояния металла на его механические свойства и явления электропластичности / О.А. Троицкий // Проблемы прочности. – 1977. – № 1. – С. 34–48.
14. Рощупкин, А.М. Физические основы электропластической деформации металлов / А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов. – Изв. ВУЗов сер. Физика. – 1996. – № 3. – С. 57–65.
15. Кирьянчев, Н.Е. Электропластическая деформация металлов (обзор) / Н.Е. Кирьянчев, О.А. Троицкий, С.И. Клевцур // Проблемы прочности. – 1983. – № 5. – С. 101–105.
16. Okazaki, K. Study of the electroplastic effect in metals / K. Okazaki, M. Kijagawa, H.A. Conrad // Scr. Met. – 1978. – Vol. 12. – № 11. – P. 1063 – 1068.
17. Громов, В.Е. О механизмах электропластического эффекта в металлах / В.Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 10. – С. 71–75.
18. Specher, A.F. On the mechanism for the electroplastic effect in metals / A.F. Specher, S.L. Mannan, H. Conrad // Acta Met. – 1986. – V. 34. – № 7. – P. 1145–1162.
19. Зуев, Л.Б. Действие импульсов электрического тока на подвижность дислокаций в монокристаллах / Л.Б. Зуев, В.Е. Громов, Л.И. Гуревич // Металлофизика. – 1990. – Вып. 12. – № 4. – С. 11–15.
20. Степанев, Н.В. Сравнительный анализ решения транспортной задачи с использованием систем компьютерной математики: дипломная работа/ Н.В. Степанев. – Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – 43 с.
21. Дьяконов, В. Matlab. Анализ, идентификация и моделирование систем: специальный справочник/ В. Дьяконов, В. Круглов. – М.: СПб: Питер, 2002. – 448 с.
22. Дьяконов, В. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 384 с.
23. Ануфриев, И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
24. Беклемишев, Н.Н. О процессе пластической деформации в импульсном электромагнитном поле некоторых проводящих материалов/ Н.Н. Беклемишев, Н.И. Корягин, Г.С. Шапиро // Известия академии наук СССР. – 1985. – № 1. – С. 159–161.

25. Троицкий, О.А. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства) / О.А. Троицкий // Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – Т. 1. – 590 с.
26. Троицкий, О.А. Электропластический эффект в металлах / О.А. Троицкий, А.Г. Розно // Физика твердого тела. – 1970. – Вып. 12. – № 1. – С. 203–210
27. Батаронов, И.Л. Электропластическая деформация металлов и динамический пинч-эффект / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин // Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий: тез. докл. III Междунар. конф. Новокузнецк, 1993. – С. 114.
28. Батаронов, И.Л. Влияние электростатического поля на энергию образования поверхностной ступеньки в металле / И.Л. Батаронов, Ю.В. Баранов, А.М. Рощупкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 8. – С. 64–67.
29. Троицкий, О.А. Влияние основных параметров тока на величину электронно-пластического эффекта / О.А. Троицкий, В.И. Спицын, В.И. Стащенко // ДАН СССР. – 1981. – Т. 256, № 5. – С. 1134–1137.
30. Савенко, В.С. Влияние электропластичности на микроструктуру деформационного магния / В.С. Савенко [и др.] // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-технической конференции молодых учёных, 6–27 октября 2017. – Могилев, 2017. – С. 75.
31. Гистерезисные потери при локальном контактном деформировании электротехнического алюминия / В.С. Савенко [и др.] // Инновации в науке, образовании и технологии: сборник научных трудов по материалам XXXVIII Международной научно-практической конференции 6–7 марта 2018 – Лондон, 2018. – № 3 (38). – С. 28–30.
32. Исследование морфологии микроструктуры электротехнического алюминия в условиях электропластической деформации / В.С. Савенко [и др.] // Инновации в науке, образовании и технологии: сборник научных трудов по материалам XXXVIII Международной научно-практической конференции 6–7 марта 2018. – Лондон, 2018. – № 3 (38). – С. 25–27.
33. Морфологический анализ электротехнического алюминия в условиях электропластической деформации с использованием расчетных методов определения величины зерен / В.С. Савенко [и др.] // Приоритетные направления исследований в рамках естественных и технических наук в 21 веке: сборник научных трудов по материалам

- Международной научно-практической конференции 27 февраля 2018 г. / Под общ. ред. Е.П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2018. – С. 216–219.
34. Микротвердость при локальном контактном деформировании электротехнического алюминия / В.С. Савенко [и др.] // Приоритетные направления исследований в рамках естественных и технических наук в 21 веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 27 февраля 2018 г. / Под общ. ред. Е.П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2018. – С. 213–216.
35. Савенко, В.С. Гистерезисные потери при локально контактном деформировании алюминия АКЛП-5ПТ / В.С. Савенко, Е.Н. Галенко, Д.А. Зерница // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: Е.М. Овснюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 217–219.
36. Савенко, В.С. Морфологический анализ образцов алюминия АКЛП-5ПТ в условиях электропластичности / В.С. Савенко, Е.Н. Галенко, Д.А. Зерница // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: Е.М. Овснюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 219–220.
37. Савенко, В.С. Расчет пондеромоторных факторов в условиях электропластичности алюминия / В.С. Савенко, Н.В. Степанев, И.А. Процко // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: Е.М. Овснюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 225–227.
38. К расчету электрического поля и плотности тока пондеромоторных факторов в условиях электропластичности / В.С. Савенко [и др.] // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы X Юбилейной Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 27–30 марта 2018 / УО МГПУ

- им. И.П. Шамякина; редкол.: Е.М. Овсюк (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2018. – С. 223–225.
39. Савенко, В.С. Исследование электронного парамагнитного резонанса в слабых магнитных полях / В.С. Савенко, С.В. Петрушенко, Н.В. Степанеен // Вопросы науки и образования: научно-теоретический электронный журнал. – 2018. – № 3 (15). – С. 8–10.
40. Савенко, В.С. Вывод собственного магнитного поля при электропластичности в образце алюминия / В.С. Савенко, С.В. Петрушенко, Н.В. Степанеен // Вопросы науки и образования: научно-теоретический электронный журнал. – 2018. – № 3 (15). – С. 11–13.
41. Савенко, В.С. Расчет плотности тока и напряженности магнитного поля внутри проводника в условиях электропластичности / В.С. Савенко, А.Г. Силивонец, А.В. Гуненко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2017. – № 4. – С. 72–78.
42. Савенко, В.С. Деформационные эффекты в металлах в условиях электропластичности / В.С. Савенко // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 21–24 марта 2017 / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: И.Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2017. – С. 175–177.
43. Савенко, В.С. Влияние электропластического эффекта на микроструктуру магния / В.С. Савенко, А.В. Башак, К.Д. Федецов // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Мозырь, 21–24 марта 2017 / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: И.Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2017. – С. 177–178.
44. Савенко, В.С. Гистерезисные явления при локальном контактном деформировании материалов в условиях электропластичности / В.С. Савенко, А.В. Гуненко // Вестник ГГУ. – 2017. – № 4. – С. 24–29.
45. Савенко, В.С. Физические аспекты электропластической деформации металлов / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, А.В. Гуненко // Вестник Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка, матэматыка. – 2018. – № 2. – С. 40–48.
46. Савенко, В.С. Влияние импульсов тока на микроструктуру нержавеющей стали при непрерывной деформации / В.С. Савенко, А.В. Гуненко // Физико-технические науки и образование: проблемы,

- инновации, перспективы = Physics and Technology Sciences and Education: Problems, Innovations, Perspectives: сб. науч. ст. = Proceedings / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: И.Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – С. 121–126.
47. Савенко, В.С. Электронно-пластическая деформация металлов в условиях статистической нагрузки/ В.С. Савенко, А.В. Гуненко // Физико-технические науки и образование: проблемы, инновации, перспективы = Physics and Technology Sciences and Education: Problems, Innovations, Perspectives: сб. науч. ст. = Proceedings / УО МГПУ им. И.П. Шамякина; редкол.: И.Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – С. 126–130.
48. Савенко, В.С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, А.Г. Силивонец // Известия НАН РБ. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
49. Savenko, V.S. Influence electroplastic effect on the microstructure of magnesium/ V.S. Savenko, A.V. Bashak, K.D. Fedetsov // Actual science. – 2016. – Vol 2. – № 12. – P. 121.
50. Savenko, V.S. Transients in electrical circuits/ V.S. Savenko, A.V. Bashak, K.D. Fedetsov// Actual science. – 2016. – Vol 2. – №12. – P. 119.
51. Савенко, В.С. Влияние пондеромоторных факторов на микроструктурные характеристики магния при электропластической деформации./ В.С. Савенко, А.Г. Силивонец, С.А. Ермоковец // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27) – С. 24–29.
52. Влияние электропластической деформации на микроструктуру деформационного магния / В.С. Савенко [и др.] // Физико-технические науки и образование: проблемы и перспективы исследований»: сб. науч. трудов / редкол.: Н.В. Гуцко (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, УО МГПУ им. И.П. Шамякина, 2016. – С. 122–128.
53. Savenko, V.S. The contribution of the ponderomotive factors in the phenomenon of electroplasticity of deformational magnesium / V.S. Savenko, A.G. Silivonec, S.A. Ermokovec.// Materials of the XII International scientific and practical conference, «Modern scientific potential – 2016». Volume 19. Technical sciences. Physics, February 28 – March 7. – Sheffield: Science and education LTD, 2016. – S. 90–92.
54. Савенко, В.С. К расчету пондеромоторных факторов в электропластической деформации / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, А.Г. Силивонец // XII Всероссийский семинар-совещание «Инженерно-физические проблемы новой техники», Москва,

- 20–22 апреля 2016 г. – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 38–41.
55. Савенко, В.С. Расчет гистерезисных потерь при локальном контактом деформировании материалов в условиях электропластичности / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, С.А. Ермаковец // XII Всероссийский семинар-совещание «Инженерно-физические проблемы новой техники». – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 288–290.
56. Исследование действия импульсного тока и СВЧ-излучения на механические свойства и фазовый состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т / О.А. Троицкий [и др.] // XII Всероссийский семинар-совещание «Инженерно-физические проблемы новой техники». – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 259–266.
57. Савенко, В.С. К расчету плотности тока и напряженности магнитного поля в условиях электропластичности / В.С. Савенко, О.А. Троицкий, О.Б. Скворцов // XII Всероссийский семинар-совещание «Инженерно-физические проблемы новой техники». – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 270–272.
58. Савенко, В.С. Влияние электропластической деформации на микроструктуру деформационного магния / В.С. Савенко, С.А. Ермаковец, А.Г. Силивонец // Materials of the XII International scientific and practical conference, «Science and civilization - 2016». Volume 17. Mathematics. Physics. Modern information technologies, January 30 – February 7. – Sheffield : Science and education LTD, 2016. – S. 52–55.



*Научное издание*  
**Троицкий** Олег Александрович,  
**Савенко** Владимир Семёнович,  
**Сташенко** Владимир Иванович и др.

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ  
ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ПРОВОДНИКИ  
В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ  
И ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
СОВМЕСТНО С СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Корректор *В. В. Кузьмич*  
Оригинал-макет *Л. И. Федула*

Подписано в печать .16.11.2019. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 15,11. Уч.-изд. л. 13,29.  
Тираж 53 экз. Заказ 32.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Мозырский государственный  
педагогический университет имени И. П. Шамякина».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий N 1/306 от 22 апреля 2014 г.  
Ул. Студенческая, 28, 247777, Мозырь, Гомельская обл.  
Тел. (0236) 32-46-29