

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ЭКСПЕРИМЕНТ

## MATHEMATICAL MODELS. EXPERIMENT

УДК 621.993

DOI: 10.21209/2658-7114-2021-16-3-122-133

*Сергей Яковлевич Березин,  
доктор технических наук, профессор,  
Забайкальский государственный университет  
(673039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),  
e-mail: Berlog\_berezin2011@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-5840-1745>*

### **Обоснование режимных показателей электроимпульсной активации для операций внутреннего резбовываивания**

Процессы интенсификации резбонарезающих операций электрическим током известны с 70-х годов прошлого столетия. Операции внутреннего резбовываивания связаны с механизмом пластической деформации, и, соответственно, с высокими значениями усилий и крутящих моментов. Это снижает надёжность процесса и требует дополнительных мер по ослаблению силовой напряженности. Применение энергии коротких стимулирующих токовых импульсов позволяет решать подобные проблемы за счёт так называемого электропластического эффекта (ЭПЭ), которые проявляются за счёт дополнительных напряжений, вызывающих повышение пластичности металлов при наличии в очаге деформации электрического потенциала и температурного поля. В настоящее время ещё нет ясного представления о физических процессах, определяющих изменение напряжённо-деформированного состояния (НДС) металла при пропускании электрического тока. В статье приведён анализ информации по данному направлению, позволяющий установить ряд физических явлений, оформленных в три теории, объясняющие суть ЭПЭ в металлах: электронно-дислокационное взаимодействие, джоулевый нагрев и магнитопластичность. Представлено описание экспериментов и оборудования для электроимпульсной стимуляции операции резбовываивания. Автором предложен ряд показателей, оценивающих возможности электроимпульсного воздействия на формирование внутренней резьбы при раскатке, завинчивании резбовываивающих деталей и др. Установлена система расчетных коэффициентов, оценивающих эффективность действия импульсного тока, его параметры и режимы.

**Ключевые слова:** пластичность, электрические импульсы, электропластический эффект, деформация, кристаллическая решётка, дислокации, резбовываивание

Процессы интенсификации резьбонарезающих операций электрическим током известны с 70-х годов прошлого столетия. Операции раскатывания внутренней резьбы, а также завинчивания резьбовыдавливающих крепежных деталей в гладкие отверстия основаны на механике пластической деформации, что требует дополнительных мер по снижению силовой напряженности процесса.

Пропускание электрического тока плотностью выше  $1,0 \text{ А/мм}^2$  через металл вызывает его заметный нагрев. Электронагрев приводит к повышению пластичности, но в то же время разупрочняет деформированный металл и снижает эксплуатационные характеристики обработанных деталей.

Установлено, что при использовании режима коротких импульсов можно повысить плотность тока на несколько порядков и оставлять металл практически холодным [1]. Это объясняется тем, что за короткое время действия импульса металл не успевает заметно нагреваться, а за время паузы тепло интенсивно отводится вглубь металла. Такой режим электрического тока не приводит к устранению наклепа. Более того, при достаточно высокой плотности импульсного тока, степень упрочнения поверхности усиливается по сравнению с исходной, а усилия деформирования, тем не менее, снижаются. Кроме того, улучшается структура зерен металла, их упорядочивание и совершенство [2; 3].

Наложение электромагнитного поля без учета температурных напряжений и изменения механических напряжений вызывает увеличение концентрации вакансий по экспоненциальному закону [4]. Это объясняется тем, что с электрическим током внутрь металла вводится электромагнитная энергия, часть которой идет на их образование и перемещение.

Увеличение концентрации вакансий приводит к ослаблению кристаллической решетки и, соответственно, к уменьшению сопротивления деформированию. Это явление получило название «элекропластический эффект» (ЭПЭ) [1; 3–8].

Он проявляется за счёт дополнительных напряжений, вызывающих повышение пластичности металлов при наличии в очаге деформации электрического потенциала и температурного поля.

Таким образом, можно заключить, что влияние тока на процесс деформации действительно имеет место и проявляется через дополнительные напряжения диффузионной, электромагнитной и термической природы, возникающих на уровне взаимодействия активированного электронного потока с дислокациями.

Дислокация есть неоднородность решетки, и электроны проводимости, движущиеся вдоль проводника с дрейфовой скоростью  $u$ , неминуемо будут терять её в момент столкновения с ядром дислокации. Это и вызовет возникновение дополнительной силы. Величину этой силы можно приблизительно оценить [6] из следующих простых рассуждений. Представим дислокацию единичной длины как площадку размером  $b$ . Тогда за единицу времени с нею столкнётся  $nv$  электронов, каждый из которых имеет импульс  $p$ . Тогда общий импульс есть  $nvp$ , а сила  $bnvp$ . Используя закон Ома  $J = nve$ , получаем

$$F = bpJ/e. \quad (1)$$

Влияние импульсного электрического тока (ИЭТ) высокой плотности на напряженно-деформированное состояние (НДС) и механическое поведение металлов исследовалось с использованием физических и феноменологических моделей и подробно описано в литературе [4; 6–9].

Однако к настоящему времени еще нет ясного представления о физических процессах, определяющих изменение НДС металла при пропускании электрического тока. Действие ИЭТ на металл на макроуровне сопровождается рядом физических явлений, которые в настоящее время оформлены в три гипотетические теории, направленные на объяснение ЭПЭ в металлах: электронно-дислокационное взаимодействие, джоулевый нагрев и магнитопластичность.

Согласно теории электронно-дислокационного взаимодействия, в результате электроимпульсного воздействия могут возникать два эффекта: «электронный ветер» и разрушение металлических связей. В случае «электронного ветра» электроны протекают через металл со скоростью дрейфа, определяемой величиной прикладываемой разности потенциалов, плотности тока и характеристиками металла, что приводит к увеличению подвижности дислокаций и снижению внутренних напряжений. Практическим результатом электроимпульсного воздействия является увеличение пластичности, уменьшение усилия деформирования и снижение упругого последствия.

Теория джоулева нагрева также делится на две части: теорию объемного гомогенного джоулева нагрева и теорию гетерогенного микромасштабного джоулева нагрева. Объемный гомогенный джоулевый нагрев вызывается теплом, генерируемым при протекании электрического тока через материал в результате рассеяния электронов на ионных ядрах, дефектах решетки и дислокациях. Он приводит к термическому размягчению металла, увеличению его пластичности и сопровождается уменьшением напряжения пластической деформации, усилия деформирования и упругого последствия. Однако для того, чтобы объяснить уменьшение напряжения пластической деформации, превышающее достигнутое при изотермическом нагреве, в эту теорию был включен микромасштабный джоулевый нагрев. Предполагается, что повышенное удельное сопротивление, обусловленное дислокациями, дефектами решетки, дефектами укладки, смещением решетки и границами зерен, приводит к образованию локализованных областей повышенной температуры вокруг неоднородностей и способствует увеличению подвижности дислокаций в этих областях. Необходимо учитывать также и микроконтактный джоулевый эффект, связанный с пластификацией микронеровностей в контактной зоне деформируемой и деформирующей плоскостей. Кроме того, в контакте начинают проявляться электрохимические процессы, активизирующие смазочные слои, повышая их проникающую способность и окислительные процессы, способствуя диффузии кислорода в контактные слои [10].

В теории магнитопластичности утверждается, что пропускание импульсного электрического тока приводит к возникновению собственного магнитного поля, вы-

зывающего два эффекта: так называемое спиновое разупрочнение металла и пинч-эффект, способствующих более лёгкому перемещению дислокаций и, следовательно, уменьшению напряжения пластической деформации. Теоретически проведенный анализ этого процесса показал, что в результате спиновой конверсии под действием магнитного поля (МП), происходит открепление дислокаций от точек закрепления (стопоров) что увеличивает длину пробега дислокаций при последующих нагружениях [1; 7; 9; 11].

Предполагается, что вслед за резонансным спиновым переходом снимается квантовый запрет на определенный электронный переход в примесном центре на дислокации или в объёме кристалла, что приводит к понижению локальных барьеров и порождает релаксацию дислокационной структуры в поле внутренних напряжений. Время, необходимое для перемещения дислокаций на расстояния порядка 100 мкм, составляет несколько минут. Это значит, что дислокации движутся спустя длительное время после импульса, что свидетельствует о воздействии электромагнитного импульса непосредственно на точечные дефекты в объеме кристалла.

Учитывая выражение (1) и некоторые параметры напряженного состояния металла можно определить величину эффективного механического напряжения, вызванного действием электрического тока (электронов проводимости):

$$\sigma_{eff}^e = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{1}{2,88 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{0,333}{3,45} = 40 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\Delta Q$  – повышение энергии направленного движения электронов вблизи дефектов под действием потока электронов. Для стали  $\Delta Q = \left(\frac{t_r}{t_0}\right) \cdot K_{eff} = 0,333 \text{ эВ/атом}$ ;

$t_r$  – время термодинамической релаксации;

$t_0$  – время свободного пробега электрона;

$K_{eff}$  – эффективное снижение кинетической энергии дефектных атомов;

$\beta$  – коэффициент снижения максимального значения критического напряжения ( $\beta = 2,88 \cdot 10^{-9} \text{ (1/Па)}$  для стали);

$Q_0$  – предельная энергия термоактивации для стали  $Q_0 = 3,45 \text{ эВ/атом}$ .

Подобные значения дополнительных напряжений активации от действия электрического тока были установлены в работах [1; 5; 11].

В основе спинового разупрочнения металлов лежит также преобразование магнитным полем синглетного в триплетное состояние реакционных пар, составленных из электронов, локализованных на застопоренных примесными атомами дислокациях и на самих парамагнитных примесных атомах. Триплетные состояния находятся на более высоком энергетическом уровне и обеспечивают более лёгкое движение и преодоление дислокационных препятствий, что приводит к увеличению скорости перемещения дислокации и уменьшению напряжения пластической деформации.

Действие пинч-эффекта основано на возникновении давления собственного магнитного поля импульсного тока, вызывающего вибрацию кристаллической решётки деформируемого материала за счёт упругих колебаний её узлов по типу ультразвуко-

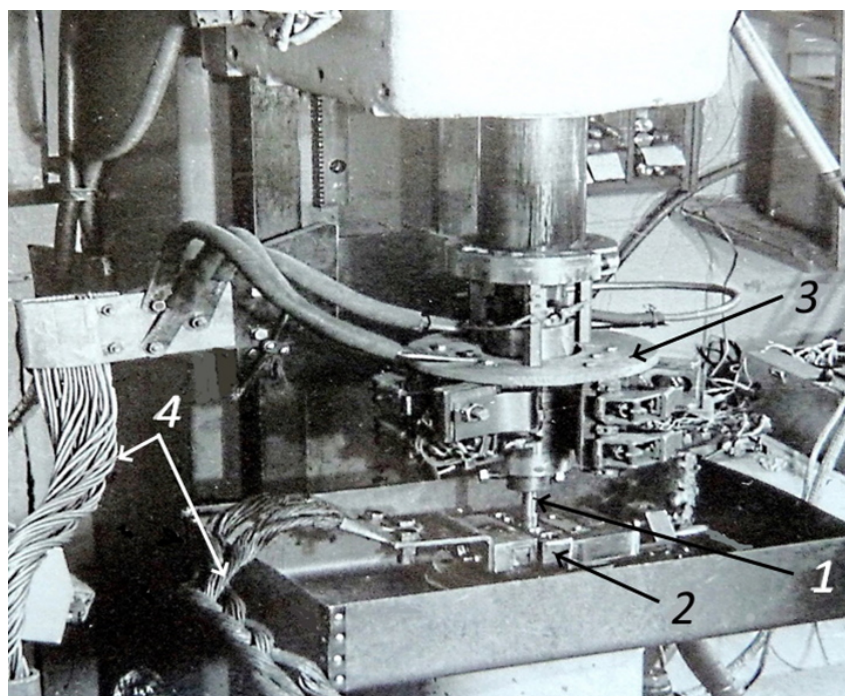
вых колебаний, что обеспечивает снижение напряжения пластической деформации [1; 6; 11; 12].

В лабораториях энергетического факультета ЗабГУ проводились работы по исследованию технологических возможностей применения импульсного электрического тока в процессах накатывания внутренних резьб. Схема экспериментальной установки для исследования процессов электроимпульсной стимуляции процессов внутреннего резьбообразования приведена на рис. 1.

Резьбовыдавливающая крепёжная деталь устанавливается в патроне шпинделя станка со специальным токоподводящим устройством. Образец с отверстиями под завинчивание закрепляется в динамометрическом приспособлении стола станка. Патрон и приспособление электрически изолированы и к ним через гибкие шины подключена вторичная обмотка трансформатора.

Подача силовых импульсов в зону резьбовыдавливания позволяет достигать снижения крутящего момента до 30 % при наибольших припусках под резьбу. При наименьших припусках ((0,25–0,32) Р) интенсивность снижения крутящего момента может составлять 35–40 %. Это объясняется уменьшением площади перекрытия витков сопрягаемой резьбы и ростом температуры в зоне контакта [12; 13].

Импульсный режим обладает наименьшей энергоёмкостью за счет кратковременности импульсов. При этом их амплитудные значения тока на экспериментальной установке достигали 3 600–4 800 А, что соответствовало значениям плотности тока 170–200 А/мм<sup>2</sup> для шагов резьбы 1,5–1,75 мм.



*Рис. 1.* Схема экспериментальной установки для исследования процесса электроимпульсной стимуляции: 1 – винт; 2 – образец с отверстиями; 3 – щёточный токоподвод; 4 – шины

*Fig. 1.* Diagram of the experimental setup for studying the process of electrical impulse stimulation: 1 – screw; 2 – sample with holes; 3 – brush current lead; 4 – tires

Процесс завинчивания обладал такой особенностью, что образцы крепёжных деталей имели резьбу, накатанную с небольшой обратной конусностью, порядка 0,25–0,35 %, а поверхность была защищена изолирующим фосфатным покрытием. При завинчивании электрический контакт формировался только в области деформирующей части заходного витка, покрытие которой истиралось под действием высоких контактных давлений [14].

По поводу значений плотностей тока, вызывающих заметную реакцию силовых показателей процессов деформирования кристаллических материалов, существуют некоторые неопределённости. В ходе различных исследований установлено явление, известное как *пороговая плотность* тока. Ниже определённой плотности тока (в зависимости от материала и процесса) ЭПЭ будет незначительным, а после достижения порогового значения эффекты будут наибольшими. Например, во время двухстороннего сжатия образцов магния было установлено, что при плотности тока 30 А/мм<sup>2</sup> металл растрескивался, а выше этой пороговой плотности трещины не были зафиксированы [7].

При простом и сложном изгибе аналогично испытаниям на растяжение и сжатие воздействие импульсного электрического тока приводит к возникновению ЭПЭ. Изгибающие силы могут быть уменьшены, а пластичность – увеличена. Было показано, что электрический ток оказывает значительное влияние на снижение упругого возврата в высокоуглеродистых легированных сталях, повышая точность изготовления изделий, упругость материала и могут быть эффективно снижены остаточные напряжения. По мере увеличения плотности тока и уменьшения длительности импульса упругий возврат снижался до 77 % до тех пор, пока плотность тока не достигла порогового значения 120 А/мм<sup>2</sup> [12].

Есть данные о локальном уровне механических напряжений в металле под термоактивирующим действием электронного ветра, которые, при значении плотностей тока порядка 250 А/мм<sup>2</sup>, могут достигать величины 10<sup>4</sup> дин/см<sup>2</sup> (~ 1 кПа) [1].

Американские исследователи Сюнь Лю, Шухуай Лан и Джун Ни при исследовании стальных образцов установили, что ЭПЭ не может быть инициирован эффективно до тех пор, пока плотность тока не достигнет порогового значения между 7,4 и 11,4 А/мм<sup>2</sup>. Кроме того, явление размягчения более отчетливо проявляется при больших деформациях. Основные механизмы объясняются с позиций дислокационного умножения, скольжения и механического двойникования. Неизбежное явление джоулевого нагрева, связанное с током, подавлялось принудительным воздушным охлаждением, и распределение температуры внутри растягивающегося образца было численно рассчитано с помощью связанной конечно-элементной модели. Эффективность ЭПЭ, а не термического размягчения или расширения, была дополнительно доказана при большем снижении напряжений потока при более высокой плотности тока и более коротких импульсах при том же повышении температуры [15].

Проводили эксперименты по растяжению образцов из дуплексных нержавеющей сталей при воздействии на процесс электрического тока плотностью 5...15 А/мм<sup>2</sup> (5 · 10<sup>4</sup> ... 15 · 10<sup>4</sup> А/мм<sup>2</sup>) Генарри К., Пеззато Л. с коллегами [16]. Обнаружено уве-

личение равномерного удлинения при электрических испытаниях по сравнению с тепловыми аналогами, а также увеличение общего удлинения.

В технологических процессах, связанных со значительными усилиями деформации (прокатка, волочение, прессование и др., а также при испытаниях материалов на прочность), большинство авторов устанавливали рекомендованные уровни пороговой плотности импульсного тока в пределах  $10^5 - 10^6$  А/см<sup>2</sup> [3; 4; 8; 9; 11].

Очевидно, что каждая операция и каждый деформируемый материал требуют индивидуального подхода к установлению не только пороговых режимов плотности стимулирующих импульсов тока, но и определенных показателей, характеризующих физико-механические и другие особенности каждой их технологических операций.

В нашем случае также исследовались возможности электроимпульсной стимуляции и показатели режимов, позволяющие произвести оценочные расчеты параметров, характеризующих ход операции. Для этого был предложен ряд показателей, например, коэффициент токоёмкости  $K_I$ , представляющий собой мощность серии импульсов, отнесенную к величине деформируемого объема и единице скорости деформации

$$K_I = \frac{\hat{I} \cdot z \cdot t_{И}}{V_{Д} \cdot \nu}, \quad \left[ \frac{A \cdot c}{\text{мм}^3 \cdot \frac{M}{c}} \right] \quad (3)$$

где  $\hat{I}$  – амплитудное значение тока;

$z$  – число импульсов, приходящееся на длину деформирующего участка;

$t_{И}$  – время импульса;

$\nu$  – окружная скорость, м/с;

$V_{Д}$  – величина деформируемого объёма.

Для наших экспериментов коэффициенты токоёмкости занимали диапазон 10–35 [А · с<sup>2</sup>/мм<sup>3</sup> · м] для образцов из стали.

Для исследования значений коэффициентов токоёмкости при различных условиях и процессах необходимо определиться с параметрами подаваемых в зону деформации электрических импульсов. Задача определения частоты подаваемых в зону деформации импульсов рассматривалась в работах [3; 13; 17].

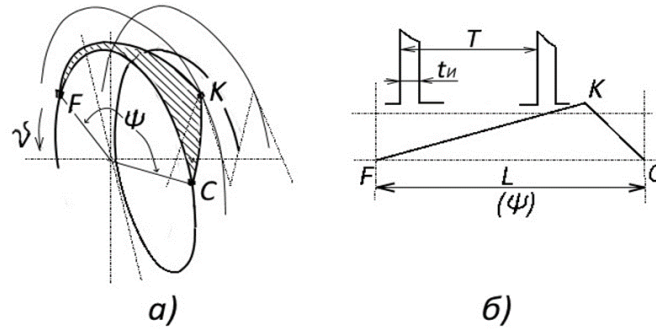
Чтобы установить эти параметры, необходимо обратиться к рис. 2. Деформирующая часть витка резьбы представляет собой криволинейный треугольник  $FKC$  длиной  $L$  и центральным углом  $\Psi$ . При деформации он внедряется в металл с окружной скоростью  $\nu$  (рис. 2а). Время перемещения деформирующей области равно

$$t_{Д} = \frac{L}{\nu} \quad (4)$$

Введём условие, что за время  $t_{Д}$  на длину  $L$  будет приходиться не менее двух импульсов (рис. 2б). Тогда справедливо условие  $2T < t_{Д}$ . Далее можно определить частоту следования импульсов

$$f > \frac{2\nu}{L}. \quad (5)$$

В пределах скоростей  $\nu = 0,07 - 0,1$  м/с частоты соответствуют диапазону 8–13 Гц.



**Рис. 2.** Параметры деформирующей области: а) форма деформирующей части  $FKC$ ;  $\nu$  – скорость вращения;  $\psi$  – центральный угол, определяющий её длину  $L$ ;  
б) распределение импульсов по длине  $FKC$

**Fig. 2.** Parameters of the deforming region: а) the shape of the deforming part  $FKC$ ;  $\nu$  – is the rotation speed;  $\psi$  is the central angle that determines its length  $L$ ; б) distribution of impulses along the length  $FKC$

Кроме частоты на эффект деформации влияет и величина скважности импульсов  $g = 1/f \cdot T_{И}$ . С приближением скважности к единичному значению импульсный режим практически превращается в непрерывный режим тока. В этом случае будет доминировать только джоулевый нагрев и повышаться мощность. Поэтому очень важно установить такие режимы тока, которые будут оптимальными и экономичными с точки зрения действия ЭПЭ. Для этого предлагается оценивать эффективность режимов по их влиянию на силовые показатели процесса, а именно на величину снижения крутящего момента от действия импульсного тока. Введем значение *коэффициента эффективности* действия тока, равное

$$K_M = \frac{\Delta M}{\hat{I} \cdot z \cdot t_{И}}, \quad \left[ \frac{H \cdot м}{A \cdot c} \right], \quad (6)$$

где  $\Delta M$  – величина снижения крутящего момента в результате действия электрических импульсов.

Повышение амплитуды и мощности импульсов электросиловой установкой выше указанных значений едва ли целесообразно, так как существуют и другие сдерживающие факторы. Например, соотношение электро- и теплопроводности материалов корпуса. Предельные значения характеристик материалов, позволяющих обеспечить заметное влияние электрического тока на снижение усилий резбовывающего можно оценить *коэффициентом свойств материала*

$$K_p = \frac{p}{\lambda}; \quad \left[ \frac{Ом \cdot мм^2 \cdot K}{Вт} \right], \quad (7)$$



где  $p$  – удельное сопротивление материала;

$\lambda$  – теплопроводность материала.

$K_p = 0,02$ ,  $K_p = 0,02 \left[ \frac{H \cdot m}{A \cdot c} \right]$  – для серого чугуна;

$K_p = 2,5 \cdot 10^{-3}$  – для углеродистых сталей;

$K_p = 1,4 \cdot 10^{-4}$  – для магниевых сплавов;

$K_p = 1,3 \cdot 10^{-4}$  – для алюминиевых сплавов.

Оказалось, что, применение электроимпульсной стимуляции резьбообразования для материалов с  $K_p < (0,95 - 1,0) \cdot 10^{-3}$  малоэффективно.

Понимание природы ЭПЭ позволит более эффективно моделировать результаты его применения, разработать и внедрить в производство новые технологические процессы, понять и сформулировать требования к процессам управления энергосиловыми параметрами оборудования, прогнозировать стойкость и износ инструмента, а также взаимосвязь давления и деформации при таких широко распространённых процессах формообразования, как штамповка, прокатка и волочение и др.

Таким образом, в результате проведенного анализа известных исследований, были установлены:

1. Механизмы действия ИЭТ по повышению пластичности материала и снижению сил трения. Они основаны на электронно-дислокационном взаимодействии, джоулевым нагреве и магнитопластичности. Так называемое спиновое разупрочнение металла и пинч-эффект, также способствуют более лёгкому перемещению дислокаций и, следовательно, уменьшению напряжений пластической деформации.

2. Для численной оценки эффективности действия ИЭТ на процесс резьбонакатывания предложена система коэффициентов, включая коэффициент токоёмкости  $K_I$ , коэффициент эффективности действия ИЭТ на крутящий момент  $K_M$  и коэффициент свойств материала  $K_p$ , которые позволяют более детально сравнивать различные режимы тока и сборки деталей.

3. Частотные режимы ИЭТ для операций класса резьбонакатывания, отвечающие геометрическим и скоростным их показателям.

### *Список литературы*

1. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Физика. Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93–99.

2. Климов К. М., Новиков И. И. О новых возможностях пластического деформирования металлов // Пластическая деформация легких и специальных сплавов. 1978. № 1. С. 284–291.

3. Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. № 9. С. 65–76.

4. Громов В. Е., Зуев Л. Б., Козлов Э. В., Целлермайер В. Я. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1996. 290 с.

5. Березин С. Я. Возможности электроимпульсной активации операций завинчивания резьбовыдавливающего крепежа // Кулагинские чтения: материалы XIX междунар. науч.-практ. конф. Чита: ЗабГУ, 2019. С. 245–252.

6. Зуев Л. Б. Электрические поля и пластичность кристаллов // Физика. Соросовский образовательный журнал. 1998. № 9. С. 92–95.
7. Минько Д. В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 125–130. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-4-125-130.
8. Спицин В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
9. Гагарин А. Ю., Сарычев В. Д., Невский С. А., Потекаев А. И. Влияние импульсного электрического тока на характер движения автоволн пластической деформации при растяжении стальной пластины // Известия вузов. Чёрная металлургия. 2019. № 2. С. 148–153. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-148-153.
10. Кончиц В. В. Влияние электрического тока на фрикционное взаимодействие металлов // Трение и износ. 1981. № 1. С. 170–176.
11. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. Оценка влияния импульсного электрического тока высокой плотности на скорость пластической деформации металлов // Проблемы прочности. 2006. № 2. С. 105–113.
12. Ruszkiewicz B. J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J. T. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing With Emphasis on Modeling and Understanding of the Electroplastic Effect // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017. No. 11. P. 110801 (1–15).
13. Березин С. Я. Режимы импульсных энергоустановок для интенсификации внутреннего резьбовывдавливания // Вестник Читинского государственного технического университета. 1997. Вып. 4. С. 25–32.
14. Патент № 2173416 Российская Федерация, МПК F16B 25/06. Способ получения тугого резьбового соединения и крепёжная деталь: № 9812355/28; заяв. 16.12.98; опубл. 10.09.2001 / С. Я. Березин, Н. Н. Грушева; заявитель и патентообладатель Читинский государственный технический университет (ЧитГТУ).
15. Liu, X., S. Lan and J. Ni. Experimental study of electro-plastic effect on advanced highstrength steels // Materials Science and Engineering; 2013. A582. P. 211–218. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.092.
16. Gennari Cl., Pezzato L., Simonetto E. and others. Investigation of Electroplastic Effect on Four Grades of Duplex Stain-less Steels // Materials. MDPI AG. 2019. No. 12. 1 P. 18. DOI: 10.3390/ma12121911.
17. Рыжков В. Г., Соколов Н. В., Троицкий О. А. Генераторы импульсного тока для исследования электропластической деформации металла // Электрическая обработка материалов. 1979. № 3. С. 81–83.

*Статья поступила в редакцию 12.04.2021; принята к публикации 17.05.2021*

#### **Библиографическое описание статьи**

*Березин С. Я.* Параметры процесса пластической деформации при внутреннем резьбовывдавливании // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 16, № 3. С. 122–133. DOI: 10.21209/2658-7114-2021-16-3-122-133.

*Sergey Ya. Berezin,*  
*Doctor of Engineering Sciences, Professor,*  
*Transbaikal State University*  
*(30 Aleksandro-Zavodskaya str., Chita, 672039, Russia),*  
*e-mail: Berlog\_berezin2011@mail.ru,*  
*<https://orcid.org/0000-0001-5840-1745>*

## **Operating Parameters of Electric Pulse Activation for Internal Tapping-Screw Operations and its Justification**

The processes of intensification of thread-cutting operations by electric current have been known since the 70s of the last century. Internal threading operations are associated with the mechanism of plastic deformation, and, accordingly, with high values of forces and torques. This reduces the reliability of the process and requires additional measures to reduce power tension. The use of the energy of short stimulating current pulses makes it possible to solve such problems due to the so-called electro-plastic effect (EPE). It is manifested due to additional stresses that cause an increase in the plasticity of metals in the presence of an electric potential and a temperature field in the deformation center. At present, there is still no clear understanding of the physical processes that determine the change in the VAT of a metal when an electric current is passed. The article presents an analysis of information in this area, which allows us to establish a number of physical phenomena, which are formed into three theories that explain the essence of EPE in metals: electron-dislocation interaction, joule heating, and magnetoplasticity. A description of experiments and equipment for electro-pulse stimulation of the threading operation is presented. The author offers a number of indicators that evaluate the possibilities of electric pulse action on the formation of internal threads when rolling threads, screwing thread-pressing parts, etc. A system of calculated coefficients evaluating the efficiency of the pulse current, its parameters and modes is established.

**Keywords:** plasticity, electrical impulses, electroplastic effect, deformation, crystal lattice, dislocations, tapping thread

### **References**

1. Bataronov, I. L. Mechanisms of electroplasticity. Soros educational journal, no. 10, pp. 93–99, 1999. (In Rus.)
2. Klimov, K. M., Novikov, I. I. About new possibilities of plastic deformation of metals. Plastic deformation of light and special alloy, no. 1, pp. 284–291, 1978. (In Rus.)
3. Troitsky, O. A. Electroplastic effect in metals. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, no. 9, pp. 65–76, 2018. (In Rus.)
4. Gromov, V. E., Zuev, L. B., Kozlov, E. V., Tsellermayer, V. Ya. Electrostimulated plasticity of metals and alloys. Moskva: Nedra, 1996. (In Rus.)
5. Berezin, S. Ya. Possibilities of electropulse activation of screw-in operations of thread-tapping fasteners. Kulagin readings. Materials of the XIX International Day. scientific.-practical. conf. Chita: ZabGU, 2019: 245–252. (In Rus.)
6. Zuev, L. B. Electric fields and crystal plasticity. Soros educational journal, no. 9, pp. 92–95, 1998. (In Rus.)

7. Minko, D. V. Analysis of prospects for the use of the electro-plastic effect in metal forming processes. Casting and metallurgy, no. 4, pp. 125–130, 2020. (In Rus.). DOI: 10.21122/1683-6065-2020-4-125–130.
8. Spitsin, V. I., Troitsky, O. A. Electroplastic deformation of metals. Moscow: Nauka, 1985. (In Rus.)
9. Gagarin, A. Yu. Influence of pulsed electric current on the nature of the motion of autowaves of plastic deformation under tension of a steel plate. Izvestiya. Ferrous Metallurgy, no. 2, pp. 148–153, 2019. (In Rus.). DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-148-153.
10. Konchits, V. V. Influence of electric current on the frictional interaction of metals. Friction and wear, no. 1, pp. 170–176, 1981. (In Rus.)
11. Stepanov, G. V., Babutskij, A. I. Evaluation of the effect of high-density pulsed electric current on the rate of plastic deformation of metals. Strength problems, no. 2, pp. 105–113, 2006. (In Rus.)
12. Ruskiewicz, B. J., Grimm, T., Ragai, I., Mears, L., Roth, J. T. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing With Emphasis on Modeling and Understanding of the Electro-plastic Effect. Journal of Manufacturing Science and Engineering, no. 11, pp. 110801(1-15), 2017. (In Engl.)
13. Berezin, S. Ya. Modes of pulsed power plants for the intensification of internal thread-tapping. Bulletin of the Chita State Technical University, no. 4, pp. 25–32, 1997. (In Rus.)
14. Patent RU 2173416. MPK F16B 25/06. Method for obtaining a tight threaded connection and a fastener. S.Ya.Berezin, N.N. Grusheva; applicant and patentee Chitinsky state. tech. un-t (ChitSTU). No. 9812355/28; application 12/16/98; publ.10.09.2001. (In Rus.)
15. Liu, X., S. Lan and J. Ni. Experimental study of electro-plastic effect on advanced highstrength steels. Materials Science and Engineering: A582. 2013. P. 211–218. (In Engl.) DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.092.
16. Gennari, C., Pezzato, L., Simonetto, E. and others. Investigation of Electroplastic Effect on Four Grades of Duplex Stainless Steels. Materials. MDPI AG. 2019, 12, 1911. P. 18: (In Engl.). DOI: 10.3390/ma12121911.
17. Ryzhkov, V. G., Sokolov, N. V., Troitsky, O. A. Pulse current generators for the study of electroplastic deformation of metal. Electrical material handling, no. 3, pp. 81–83, 1979. (In Rus.)

*Received April 12, 2021; accepted for publication May 17, 2021*

#### Reference to article

*Berezin S. Ya.* Operating Parameters of Electric Pulse Activation for Internal Tapping-Screw Operations and its Justification. 2021. Vol. 16, No. 3. PP. 122–133 DOI: 10.21209/2658-7114-2021-16-3-122-133.