



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>
УДК 621.7.044

Поступила 20.10.2020
Received 20.10.2020

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Д. В. МИНЬКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. E-mail: dminko@bntu.by

Механические свойства металлов изменяются временно или постоянно под действием электрического тока высокой плотности в зоне деформации. Это явление называется электропластичностью и его использование позволяет интенсифицировать процесс обработки давлением электропроводящих материалов, в том числе труднообрабатываемых с помощью существующих технологий. К настоящему времени нет устоявшейся точки зрения на физическую природу проявления электропластичности, хотя сам по себе этот эффект уже нашел практическое применение. Электропластичность металлов и их сплавов изучалась при различных условиях нагружения, включая испытания на растяжение, сжатие, изгиб. В статье анализируются описанные в научных публикациях теоретические механизмы возникновения электропластичности, результаты исследований электропластических свойств различных металлов или металлических сплавов и рекомендации по практическому применению электропластического эффекта.

Ключевые слова. Электропластичность, электрический ток, импульс, деформация, предел текучести, растяжение, сжатие, изгиб.

Для цитирования. Минько, Д.В. Анализ перспектив применения электропластического эффекта в процессах обработки металлов давлением / Д.В. Минько // *Литье и металлургия*. 2020. № 4. С. 125–130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF THE APPLICATION OF THE ELECTROPLASTIC EFFECT IN THE PROCESSES OF PROCESSING METALS WITH PRESSURE

D. V. MINKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: dminko@bntu.by

The mechanical properties of metals change temporarily or permanently under the influence of a high density electric current in the deformation zone. This phenomenon is called electroplasticity, and its use makes it possible to intensify the process of pressure treatment of electrically conductive materials, including those that are difficult to machine using existing technologies. By now, there is no established point of view on the physical nature of the manifestation of electroplasticity, although this effect itself has already found practical application. The electrical plasticity of metals and their alloys was studied under various loading conditions, including tensile, compression, and bending tests. The article analyzes the theoretical mechanisms of the occurrence of electroplasticity described in scientific publications, the results of studies of the electroplastic properties of various metals or metal alloys, and recommendations for the practical application of the electroplastic effect.

Keywords. Electroplasticity, electric current, impulse, deformation, yield point, tension, compression, bending.

For citation. Minko D. V. Analysis of the prospects of the application of the electroplastic effect in the processes of processing metals with pressure. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 125–130. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>.

Введение

Применение методов воздействия на материалы импульсных электрических токов дает возможность существенно повысить эффективность производства, что вызывает в последнее время большой научный интерес и, как следствие, появление большого количества теоретических и экспериментальных работ по данной тематике. Обработка материалов давлением, дополняющаяся электроимпульсным воздействием, является комплексным процессом, поскольку на его протекание оказывают влияние скорость деформации, температура и параметры электрических импульсов. Высокая скорость деформации приводит к увеличению сопротивления деформированию материала. С другой стороны, с увеличением температуры сопротивление материала деформированию снижается. Электроимпульсное воздействие

при определенных условиях может приводить как к увеличению сопротивления деформированию материала, так и его снижению. При высоких плотностях тока на процесс деформации оказывает влияние электропластический эффект (ЭПЭ) [1], который наряду с нагревом джоулевым теплом приводит к снижению сопротивления материала деформированию и улучшению его структурной однородности.

Результаты анализа

ЭПЭ был обнаружен в 1969 г. советским ученым О. А. Троицким [2], который установил, что воздействие одиночных импульсов электрического тока плотностью $\sim 10^5 \text{ A/cm}^2$ и длительностью $\sim 10^{-4}$ с во время деформации кристаллов цинка при растяжении-сжатии скачкообразно снижало напряжение пластического течения. Воздействие тока не сопровождалось каким-либо существенным тепловым эффектом. Максимальное действие импульсного электрического тока проявляется на пределе текучести металлов [3]. Под действием одиночного импульса тока на кривой течения возникает скачок деформирующего напряжения. Величина скачка зависит от амплитуды импульса тока. При пропускании серии импульсов формируется характерная скачкообразная кривая деформации. В последующие годы ЭПЭ был детально исследован в металлах, а его технологические приложения – в процессах обработки практически значимых металлов и сплавов давлением: при волочении (Университет Гонконга, Китай) [4], прокатке (Университет Цинхуа, Шэньчжэнь, КНР) [5], вытяжке, штамповке (Университет Клемсона, Гринвилл, США) [6], твердофазном спекании (Технический университет Дармштадта, Германия) [7] и сварке (Университет Нова-де-Лиссабон, Капарик, Португалия) [8].

В настоящее время существуют три основные теории, которые направлены 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 [3]. Практическим результатом электроимпульсного воздействия является увеличение пластичности, уменьшение усилия деформирования и снижение упругого последействия. Чрезмерное присутствие электронов в кристаллической решетке при определенных условиях может также способствовать усилению пластической деформации за счет ослабления металлических связей [9], образующихся в кристаллической решетке за счет обмена электронами в электронном облаке, которое окружает положительно заряженные ионы. Появление дополнительных электронов в результате электроимпульсного воздействия приводит к снижению интенсивности обмена электронами и к ослаблению связей между ионами. Этот эффект может проявляться в случае чрезвычайно высокой плотности тока, когда ионы получают возможность перемещаться через кристаллическую решетку, что приводит к ее разрушению и значительному уменьшению усилия деформирования, напряжения пластической деформации и упругого последействия.

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 [3]. Он приводит к термическому размягчению металла, увеличению его пластичности и сопровождается уменьшением напряжения пластической деформации, усилия деформирования и упругого последействия. Таким образом, механизмы объемной гомогенной теории джоулева нагрева аналогичны механизмам объемного изотермического нагрева от внешнего источника. 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 [10]. Результатом такого неоднородного нагрева являются наблюдаемые при электроимпульсном воздействии скачки напряжения пластической деформации. По разным оценкам предполагается, что возникновение ЭПЭ только 40–70 % зависит от объемного джоулева нагрева [11], остальное приходится на микромасштабный джоулевый нагрев.

В теории магнитоупругости утверждается, что пропускание импульсного электрического тока приводит к возникновению собственного магнитного поля, вызывающего два эффекта: так называемое спиновое разупрочнение металла [12] и пинч-эффект [13], способствующих более легкому перемещению дислокаций и, следовательно, уменьшению напряжения пластической деформации. В основе спинового разупрочнения металлов лежит 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 легкое 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 решетки деформируемого материала за счет упругих колебаний ее узлов по типу ультразвуковых колебаний, что обеспечивает снижение напряжения пластической деформации.

В настоящее время электроупругий эффект обнаружен и экспериментально исследован у многих металлов и сплавов, которые в отсутствие импульсов электрического тока демонстрируют гладкие (без скачков) кривые деформации, и, несмотря на продолжающуюся дискуссию относительно механизмов этого явления, электроимпульсная обработка используется на практике в технологиях обработки металлов давлением [1]. Для уточнения теоретических моделей различными группами исследователей проводились испытания на растяжение, сжатие и изгиб в процессе ЭПЭ. Результаты испытаний показывают уменьшение напряжения текучести, энергии пластической деформации и упругого пружинения при воздействии электрического тока разной интенсивности и частоты.

Целью исследований [14, 15] являлась оценка особенностей ЭПЭ при растяжении стальной и титановой проволоки и установление связи между видом тока и химическим составом материала проволоки. Исследовали сварочную проволоку марок ПСГ 0301 (углеродистая сталь), ER 308LSi (нержавеющая сталь) и ВТ1–0 (технически чистый титан) диаметром 0,8, 1,0 и 0,8 мм соответственно, полученную многостадийной деформационной обработкой, включающей прокатку, волочение и промежуточные отжиги. Образцы из стальной проволоки перед растяжением отжигали на воздухе при температуре 1000 °С и охлаждали в печи, чтобы создать равновесную структуру феррит + перлит (стальная проволока) и аустенит (нержавеющая проволока). Титановую проволоку исследовали в состоянии до и после вакуумного отжига при 850 °С. Результаты показывают, что введение одиночных импульсов тока при растяжении вызывает скачки кривой на диаграмме напряжения, направленные вниз. Прочность и относительное удлинение образцов при всех режимах тока изменяются аналогичным образом и не зависят от вида тока. Амплитуда скачка в отожженной проволоке на 20–30% выше, чем в неотожженной, что может быть связано с длиной свободного пробега дислокаций. Ассиметричный характер отдельного скачка предположительно объясняется мгновенной скоростью нагрева проволоки при введении импульса тока и последующим медленным ее охлаждением на воздухе. Одиночные импульсы тока практически повторяют форму кривой без тока, не влияют на прочность проволоки и в меньшей степени снижают пластичность до разрушения. С увеличением интенсивности вводимого тока прочность уменьшается, особенно сильно в отожженном состоянии, для многоимпульсного и постоянного тока. Анализ показывает, что причиной является образование шейки при растяжении образцов проволоки, в результате чего резко повышается плотность тока и соответственно температура, достигающая 50 °С при одиночных импульсах, 280 °С – при многоимпульсном токе и 250 °С – при постоянном токе. Сравнивая поведение кривых для разных режимов тока и максимальные температуры в процессе растяжения, можно предположить, что влияние тока в первую очередь связано с тепловым эффектом, который максимален для постоянного тока и минимален для одиночных импульсов. Таким образом, подтверждено, что результат проявления ЭПЭ зависит от химического состава материала и режимов вводимого тока. Вклад ЭПЭ увеличивается с уменьшением интенсивности тока (одноимпульсный ток) и практически замещается тепловым эффектом при ее повышении (многоимпульсный ток и постоянный ток).

Показано, что при сжатии и растяжении существует явление, известное как пороговая плотность тока. Ниже определенной плотности тока (в зависимости от материала и процесса) ЭПЭ будет незначительным, после достижения порогового значения эффекты будут большими. Предельные плотности тока проще фиксируются при сжатии для различных материалов, чем при растяжении. Во время двухстороннего сжатия образцов магния марки AZ31В было установлено, что при плотности тока 30 А/мм² металл растрескивался, а выше этой пороговой плотности трещины не были зафиксированы [16]. Кроме того,

установлено, что величина снижения напряжения при сжатии положительно коррелирует с размером зерна. Большие размеры зерен меди при испытании на сжатие меньше подвержены влиянию электропластичности, чем мелкие зерна из-за малой площади поверхности границ зерен [17].

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. Без электроимпульсного воздействия при изгибе на боковой поверхности образцов титана наблюдалось трещинообразование, при введении импульсного тока трещины исчезали. Было показано, что электрический ток оказывает значительное влияние на снижение упругого возврата в высокоуглеродистых легированных сталях, повышая точность изготовления изделий. Упругость материала может быть эффективно уменьшена путем введения электрического тока через площадь концентрации остаточного 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/мм² [18].

На примере соединения пары металлов сталь 20 + медь М1, сжатых давлением на уровне 50 МПа, определен наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсного тока, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования поверхностей, а значит, формированием сварного соединения [19].

Некоторые рекомендации по практическому применению ЭПЭ при любом виде обработки металлов давлением сформулированы автором его открытия [20]:

- в процессе обработки материала деформирующие напряжения должны превышать его предел текучести;
- для усиления ЭПЭ зона деформации, кроме действия импульсов тока, может подвергаться действию СВЧ-излучения;
- длительность импульсов тока прямоугольной и трапецеидальной формы должна быть близка к характерным временам скачков деформации 10^{-4} – 10^{-3} с и не превышать $(1,5–2,5) \cdot 10^{-2}$ с, если нежелательны значительные тепловые процессы;
- амплитудная плотность тока должна быть не менее 10^5 – 10^6 А/см² с тем, 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;
- частота следования импульсов должна быть достаточной (как правило, сотни герц) для того, чтобы все участки движущейся сквозь зону деформации заготовки успевали прорабатываться током.

Действие ЭПЭ во время обработки металлов давлением приводит к следующим основным результатам:

- снижению сопротивления металла деформированию на 25–30%;
- увеличению пластичности металла во время обработки;
- увеличению остаточной пластичности до 30%;
- повышению степени совершенства аксиальной текстуры проволоки при волочении, приводящему к снижению ее электрического сопротивления на 15%;
- улучшению структуры и фазового состава материала проволоки;
- при прокатке, волочении и вытяжке нержавеющей сталей практически полностью подавляется аустенитно-мартенситное фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, что делает ненужными операции дорогостоящих и энергоемких аустенизирующих отжигов;
- уменьшению вероятности хрупкого разрушения материала во время обработки.

Выводы

Большинство экспериментальных исследований ЭПЭ выполнено на монокристаллах и поликристаллах, чистых металлах и их сплавах и посвящено проверке влияния джоулевого нагрева. Это объясняется трудностями прямого выявления на микромасштабном или атомном уровне таких динамических эффектов, как разрушение металлических связей, «электронного ветра» или возникновение магнитоэластичности, в то время как изменения напряжения пластической деформации при нагреве легко регистрируются. Вместе с тем, новые материалы, например, порошковые, композиционные, нанокристаллические, сплавы с метастабильными фазовыми состояниями остаются слабо или вообще не исследованными. Ограниченное применение ЭПЭ на практике связано с недостаточно понимаемой природой (механизма) этого явления и не исследованностью параметров, регулирующих процесс и влияющих на физические свойства

и эксплуатационные характеристики обрабатываемых материалов. Фундаментальной и нерешенной проблемой остается вопрос о соотношении теплового джоулевого нагрева и электроимпульсного воздействия, возможность регулирования вклада каждого из них в ЭПЭ. Важным также является выяснение роли характера (постоянный, переменный, импульсный) и режимов (плотность, длительность, частота) воздействующего электрического тока, фазового состояния и зеренной структуры исходного материала. В связи с этим установление механизмов возникновения ЭПЭ в порошковых композиционных материалах, структурно-фазовое состояние которых возможно регулировать химическим составом, дисперсностью спекаемых частиц и технологическими режимами получения, является важной и практически значимой научной задачей, решение которой позволит приблизиться к раскрытию природы электропластичности.

Технический прогресс и требования экологии, особенно в автомобильной, атомной и аэрокосмической промышленности, привели к разработке и получению новых легких, высокопрочных, жаростойких материалов, которые зачастую являются труднообрабатываемыми с помощью существующих технологий. 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 распространенных процессах формообразования, как штамповка, прокатка и волочение. Применение ЭПЭ может значительно повысить энергоэффективность и уменьшить затраты на производство за счет увеличения производительности труда и снижения стоимости продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Троицкий О. А., Баранов Ю. В., Аврамов Ю. С., Шляпин А. Д.** Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства. В 2-х т. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.
2. **Троицкий О. А.** Электромеханический эффект в металлах. Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 2. № 10. С. 18–22.
3. **Спицын В. И., Троицкий О. А.** Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
4. **Guan L., Tang G., Chu P. K.** Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // *J. Mater. Res.*, 2010. Vol. 25. No. 7. P. 1215–1224.
5. **Li X., Wang F., Tang G., Zhu J.** Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. *Materials Science & Engineering*, 2014. Vol. A 618. P. 500–504.
6. **Jones J. J., Mears L., Roth J. T.** Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: Effect of current magnitude and deformation rate on forge ability // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012. Vol. 134(3), P. 034504.
7. **Langer J., Hoffmann M. J., Guillon O.** Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina // *Acta Materialia*, 2009. Vol. 57(18). P. 5454–5465.
8. **Santos T. G., Miranda R., Vilaca P.** Friction stir welding assisted by electrical joule effect // *Journal of Materials Processing Technology*, 2014. Vol. 214(10). P. 2127–2133.
9. **Salandro W., Jones J., Bunget C., Mears L., Roth J.** Electrically assisted forming: Modeling and control. NY: Springer. 2014. 317 p.
10. **Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J.** Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation // *Materials Science and Engineering A*, 2013. Vol. 574. P. 218–225.
11. **Sprecher A., Mannan S., Conrad H.** Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // *Acta Metallurgica*, 1986. Vol. 34(7). P. 1145–1162.
12. **Molotskii M., Fleurov V.** Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*, 1995. Vol. 52(22). P. 15829–15834.
13. **Троицкий О. А.** Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // *Изв. АН СССР. Сер. Физическая*. 1977. № 6. С. 118–122.
14. **Белявин К. Е., Минько Д. В., Пономарев Т. С. и др.** Электропластический эффект при растяжении стальной проволоки. 60-я Международная науч. конф. «Актуальные проблемы прочности», 14–18 мая 2018 г. Витебск: УО «ВГТУ», 2018. С. 401–403.
15. **Пономарев Т. С., Белявин К. Е., Минько Д. В. и др.** Электропластический эффект при растяжении титановой проволоки // Перспективные материалы и технологии: сб. материалов междунар. симпозиума. Брест, 27–31 мая 2019 г. Витебск: УО «ВГТУ», 2019. С. 507–509.
16. **Dzialo C., Siopis M., Kinsey B., Weinmann K.** Effect of Current Density and Zinc Content during Electrical-Assisted Forming of Copper Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010. V. 59. No. 1. P. 299–302.
17. **Siopis M. S., Kinsey B. L.** Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2010. Vol. 132. No. 2.
18. **Kim M.-S., Vinh N. T., Yu H.-H., et al.** Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2014. Vol. 15. No. 6. P. 1207–1213.
19. **Вовченко А. И., Демиденко Л. Ю., Половинка В. Д.** Влияние параметров импульсов тока на развитие физического контакта при сварке металлов давлением // *Электронная обработка материалов*. 2013. № 49(4). С. 30–34.
20. **Троицкий О. А.** Электропластический эффект в металлах // *Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации*. 2018. № 9. С. 65–76.

REFERENCES

1. **Troitsky O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D.** *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov. Teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva*. [Physical foundations and technologies of processing modern materials. Theory, technology, structure and properties]. Moscow-Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy Publ., 2004. 590 p.
2. **Troickij O.A.** *Elektromekhanicheskij effekt v metallah* [Electromechanical effect in metals]. Pis'ma v ZHETF Publ., 1969, vol. 2, no. 10, pp. 18–22.
3. **Spicyn V.I., Troickij O.A.** *Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electroplastic deformation of metals]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 160 p.
4. **Guan L., Tang G., Chu P.K.** Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *J. Mater. Res.*, 2010, vol. 25, no. 7, pp. 1215–1224.
5. **Li X., Wang F., Tang G., Zhu J.** Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling. *Materials Science & Engineering*, 2014, vol. A 618, pp. 500–504.
6. **Jones J.J. Mears L., Roth J.T.** Electrically-assisted forming of magnesium AZ31: Effect of current magnitude and deformation rate on forge ability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012, vol. 134(3), pp. 034504.
7. **Langer J., Hoffmann M.J., Guillon O.** Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57(18), pp. 5454–5465.
8. **Santos T.G., Miranda R., Vilaca P.** Friction stir welding assisted by electrical joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214(10), pp. 2127–2133.
9. **Salandro W., Jones J., Bunget C., Mears L., Roth J.** *Electrically assisted forming: Modeling and control*. NY: Springer, 2014. 317 p.
10. **Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J.** Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation. *Materials Science and Engineering A*, 2013, vol. 574, pp. 218–225.
11. **Sprecher A., Mannan S., Conrad H.** Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, 1986, vol. 34(7), pp. 1145–1162.
12. **Molotskii M., Fleurov V.** Magnetic effects in electroplasticity of metals. *Physical Review B*, 1995, vol. 52(22), pp. 15829–15834.
13. **Troickij O.A.** Plasticheskaya deformatsiya metalla, vyzvannaya pinch-effektom [Plastic deformation of metal caused by the pinch effect]. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizicheskaya*, 1977, no. 6, pp. 118–122.
14. **Belyavin K.E., Minko D.V., Ponomarev T.S. et al.** Elektroplasticheskij effekt pri rastyazhenii stal'noj provoloki [Electroplastic effect of tensile steel wire]. *60th International Scientific Conference «Aktual'nye problemy prochnosti»*, May 14–18, 2018. Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2018, pp. 401–403.
15. **Ponomarev T.S., Belyavin K.E., Minko D.V. et al.** Elektroplasticheskij effekt pri rastyazhenii titanovoj provoloki [Electroplastic effect of tensile titanium wire]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii: collection of materials of the international symposium*. Brest, May 27–31, 2019. Vitebsk, UO «VGTU» Publ., 2019, pp. 507–509.
16. **Dzialo C., Siopis M., Kinsey B., Weinmann K.** Effect of Current Density and Zinc Content during Electrical-Assisted Forming of Copper Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, vol.59, no.1, pp. 299–302.
17. **Siopis M.S., Kinsey B.L.** Experimental Investigation of Grain and Specimen Size Effects during Electrical-Assisted Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, vol. 132, no. 2, paper No. 021004.
18. **Kim M.-S., Vinh N.T., Yu H.-H., et al.** Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels under Quasi-Static Tensile Loads. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2014, vol. 15, no. 6, pp. 1207–1213.
19. **Vovchenko A.I., Demidenko L.YU., Polovinka V.D.** Vliyanie parametrov impul'sov toka na razvitie fizicheskogo kontakta pri svarke metallov davleniem [Influence of current pulse parameters on the development of physical contact during pressure welding of metals]. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2013, no. 49(4), pp. 30–34.
20. **Troickij O.A.** Elektroplasticheskij effekt v metallah [Electroplastic effect in metals]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii*, 2018, no. 9, pp. 65–76.