

УДК 539

## ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

© 2025 г. К. К. Кукуджанов<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

\*E-mail: [kkukudzhanov@yandex.ru](mailto:kkukudzhanov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 12.01.2025 г.

После доработки 30.01.2025 г.

Принята к публикации 31.01.2025 г.

Представлен обзор исследований методов улучшения физико-механических характеристик проводящих материалов, выращенных при помощи технологии аддитивных методов производства. Обзор проводится с целью разработки метода улучшения характеристик аддитивной стали 03X16N15M3 (аналог AISI 316L), изготовленной методом селективного лазерного плавления (СЛП). Данная сталь широко применяется в различных отраслях промышленности связи со своими универсальными свойствами. Кратко анализируются основные методы термической и термомеханической обработки, а также подробно метод улучшения пластических характеристик за счет воздействия на материал импульсами сильного электромагнитного поля, вызывающего в материале токи высокой плотности. На основании обзора делается предположение о целесообразности исследования влияния высокоэнергетического электромагнитного поля на улучшение пластических свойств материалов, полученных за счет применения технологии селективного лазерного плавления.

*Ключевые слова:* аддитивные материалы, селективное лазерное плавление, залечивание, импульсные токи высокой плотности, технологические дефекты, микротрещины, микропоры

DOI: 10.31857/S1026351925040016, EDN: BNBEEM

**1. Введение.** Аддитивные технологии производства деталей предполагают первоначальное трехмерное моделирование изделия с последующим послойным нанесением материала для получения требуемой формы. Наиболее распространенным является метод плавления исходной порошковой смеси металла, сплава или композита при помощи направленного воздействия источником энергии: электронного пучка, лазера или электрической дуги [1].

Применение аддитивных технологий имеет экономическую целесообразность в мелкосерийном производстве сложных деталей, которые при классических подходах к производству требуют значительных расходов на

организацию и реализацию технологического процесса [2]. Кроме того, существуют компоненты, которые крайне сложно или невозможно изготовить при помощи традиционных методов, например детали с сотовой структурой, имеющие бионический вид, формы и размеры которых могут варьироваться в зависимости от потребностей. В этом случае применение аддитивных технологий является единственным рациональным подходом к производству, при котором, в том числе с помощью моделирования методом конечных элементов, удается оптимизировать вес и форму изделий [1].

Современные технологии селективного лазерного плавления (далее – СЛП) позволяют достигать плотности, приближающейся к 100%, однако полностью исключить возникновение технологических дефектов пока не удается [4]. К типичным дефектам материалов, изготовленных методом СЛП, можно отнести газовые поры [4] (характерный размер сечения  $\sim 10$  мкм), несплошности нерегулярной формы, связанные с локальным отклонением от режимов печати и образованием зон неплавления или неполного плавления [5] (характерный размер сечения  $\sim 100 \times 100$  мкм). В результате быстрого охлаждения и больших термических градиентов могут образоваться также микропористость и трещины усадочного происхождения, в т.ч. на границах ванн расплава (треков) [6] (характерный размер сечения соответственно  $\sim 1 \times 1$  и  $100 \times 1$  мкм).

Кроме того, при эксплуатации в процессе пластического деформирования деталей, изготовленных с помощью СЛП, вышеуказанные дефекты растут, сливаются в более крупные, а также возникают новые эксплуатационные микро- и мезодефекты (несплошности), которые в итоге приводят к разрушению изделия. Характерные длины механических дефектов имеют размеры порядка 10 мкм.

Помимо несплошностей, другими типами дефектов материалов аддитивного производства являются структурные неоднородности в виде остаточных напряжений, разнотекстурности и текстуры, а также дислокаций, двойников, вакансий [7].

Здесь следует заметить, что отдельного внимания как с точки зрения дефектоскопии, так и с точки зрения улучшения механических характеристик аддитивных материалов заслуживает изучение режимов и характеристик выращивания деталей при помощи аддитивных методов. Например, в рамках текущего обзора образцы, изготовленные из одного и того же сплава разными исследователями, в экспериментах демонстрируют существенно различающиеся исходные (до улучшения) механические характеристики. Так, в работах [8] и [9] ресурсы пластичности (предельная пластическая деформация до разрушения) и пределы прочности образцов, изготовленных методом СЛП из материала AlSi10Mg, значительно различаются на  $\sim 145\%$  (2.12 и 4.6%) и  $\sim 25\%$  (350 и 437 МПа) соответственно. В работе [10] сравниваются в том числе пластические свойства образцов из Ti-6Al-4V, изготовленных при помощи технологии прямого лазерного осаждения (ПЛО или LDM) и комбинированного метода, включающего в себя СЛП и ПЛО. В результате сравнения образцы, изготовленные методом ПЛО, имеют на 25% больший ресурс пластичности, чем изготовленные комбинированным методом (показатель предельной деформации до разрушения 10 и 12.5% соответственно). После термической обработки

(отжига) образцы, изготовленные методом ПЛО, оказываются на 28% более пластичными, чем образцы, изготовленные комбинированным методом (16.4 и 12.8% соответственно). Вместе с тем более пластичные ПЛО-образцы являются на ~5% менее прочными в необработанном виде. Кроме того, предел текучести необработанных ПЛО-образцов на ~10% ниже, чем у образцов, изготовленных комбинированным методом. После термической обработки (отжига) разница в текучести и прочности практически отсутствует.

Дополнительно следует отметить влияние режима изготовления на усталостный ресурс деталей. Так, детали, изготовленные аддитивными методами, в целом имеют меньший усталостный ресурс по сравнению с деталями, изготовленными традиционными методами. Это происходит из-за наличия больших растягивающих остаточных напряжений, пористости и шероховатости поверхности (наличия поверхностных микродефектов). Более того, при различных аддитивных методах производства наблюдается существенная дисперсия усталостных свойств. Так, детали, изготовленные электронно-лучевым плавлением (EBM), имеют несколько более низкую ударную вязкость (т.е. меньший усталостный ресурс), чем детали, изготовленные традиционным способом, в то время как изготовленные методом СЛП и ПЭО (прямое энергетическое осаждение, DED) имеют значительно более низкую ударную вязкость и, соответственно, значительно меньший усталостный ресурс.

Таким образом, проблема улучшения механических свойств аддитивных материалов носит комплексный характер и в перспективных исследованиях должна рассматриваться всесторонне [11].

Данный обзор приводится с целью изучения подходов к улучшению физико-механических характеристик нержавеющей стали 03X16H15M3 (аналог AISI 316L), которая используется в широком спектре производственных задач, где требуется высокая антикоррозийная стойкость (судостроение и др.), низкая биологическая токсичность (медицина, пищевая промышленность и др.), устойчивость к агрессивным реагентам (химическая промышленность и др.). Кроме этого, хорошие свариваемые свойства делают применение данной стали совместно с технологией СЛП крайне перспективным.

**2. Термические и термомеханические методы.** В настоящее время для улучшения свойств стали 03X16H15M3 (аналог AISI 316L) и металлических аддитивных материалов после изготовления методом СЛП на практике применяют термические (отжиг) и термомеханические (горячее изостатическое прессование – ГИП) методы.

**2.1. Отжиг.** Наиболее изученным и широко применяемым методом постобработки аддитивных сталей является отжиг. Для улучшения свойств стали AISI 316L классический отжиг или нагрев для снятия остаточных напряжений [12] проводятся в диапазоне температур от 470 [13] до 987°C [14]. Остаточные напряжения, как показано в работах [15, 16], полностью снимаются при нагреве до 750°C. При нагреве до температуры выше 800°C исчезает ячеистая структура в аустенитном зерне и образуются интерметаллиды Mo, Cr на границах зерен. При этом пределы прочности и текучести существенно снижаются по мере возрастания температур отжига >600°C, а предельная деформация до разрушения может существенно возрасти. Отжиг при температурах

$< 500^{\circ}\text{C}$  не оказывает на механические свойства материала существенного воздействия [3].

В целях данной статьи необходимо отметить, что для титановых сплавов (Ti-6Al-4V и иных) на практике отжиг является основным методом улучшения их механических характеристик [11].

Однако следует заметить, что технологические и эксплуатационные (механические) дефекты с размерами больше 1 мкм при отжиге не залечиваются в металлических материалах [17]. Таким образом, для улучшения механических свойств материалов применения одного лишь отжига недостаточно.

*2.2. Горячее изостатическое прессование.* Метод горячего изостатического прессования (ГИП) металлических деталей аддитивного производства позволяет повысить плотность образцов за счет залечивания технологических дефектов. В этом методе деталь сжимается в печи в атмосфере инертного газа при температуре от 900 до 2250 $^{\circ}\text{C}$  и давлении от 100 до 200 МПа. Механизм залечивания пор под воздействием высокой температуры и давления при проведении ГИП представляет собой комбинацию высокотемпературной ползучести и последующего растворения пор в результате диффузии вакансий [18].

Эффективность залечивания зависит от первоначальной плотности детали после ее изготовления (выращивания). В работе [19] показано, что при максимальном реализуемом в методе давлении после ГИП стальных образцов с большим количеством несплошностей плотность удалось повысить лишь на 1% (с 94 до 95%). Детали с такой плотностью невозможно использовать в ответственных конструкциях. По этой же причине ГИП оказывается неэффективен при залечивании механических дефектов, возникновение которых может приводить к значительным изменениям пористости и плотности материала. Таким образом, можно констатировать, что применение ГИП для улучшения деталей, полученных при низком качестве процесса аддитивного производства, практически нецелесообразно.

В то же время ГИП образцов с более высокой плотностью после выращивания (99.7%) позволяет добиться ее повышения до 99.9% [19]. Однако стоит отметить, что в некоторых случаях наблюдается обратный эффект – пористость после ГИП может возрасти за счет давления газа, присутствующего в порах, при этом дефекты типа трещин растворяются [20].

Вследствие того, что ГИП образцов из стали 03X16N15M3 (AISI 316L) проводят, как правило, при температуре выше 1100 $^{\circ}\text{C}$ , происходит рекристаллизация структуры с растворением границ ванн расплава [21]. Относительное удлинение может возрасти в несколько раз [15, 21–23]. Предел текучести и усталостные свойства при этом существенно снижаются. Предел прочности снижается не так существенно, однако по совокупности признать метод эффективным в таких условиях проблематично.

Кроме того, еще одним недостатком использования ГИП в качестве технологии постобработки является значительное повышение стоимости конечного продукта, поскольку для этого метода требуется сложное, дорогостоящее оборудование и достаточно длительный нагрев при высоких температурах, что в условиях массового производства является существенным ограничением для его применения.

**3. Воздействие сильным импульсным электромагнитным полем (электроимпульсное воздействие или обработка).** Электропластичность, в широком смысле, как явление, при котором улучшаются пластические характеристики материала, наблюдается при воздействии на металлический образец внешним интенсивным кратковременным электромагнитным полем (далее – ЭМП) в течение интервала времени  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  с, таким, чтобы величина рассеянной удельной электромагнитной энергии в материале находилась в диапазоне  $10^6$ – $10^9$  Дж/м<sup>3</sup>. При этом за счет индуцирования тока высокой плотности под действием высокоэнергетического электромагнитного поля в поликристаллических металлах и сплавах возникает эффект эволюции микроструктуры (далее – ЭЭМ). Импульсное электромагнитное поле будем далее называть высокоэнергетическим (ВЭМП), если величина рассеянной удельной электромагнитной энергии в материале находилась в диапазоне  $10^7$ – $10^9$  Дж/м<sup>3</sup> при длительности единичного импульса  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  с.

*3.1. Традиционные материалы.* Первой работой, в которой наблюдался и исследовался эффект эволюции микроструктуры, была [24]. В ней экспериментально установлено, что в результате воздействия импульсным ВЭМП в поликристаллических металлах и сплавах происходит увеличение ресурса пластичности (предельной пластической деформации до разрушения) и уменьшение предела текучести (при незначительном уменьшении предела прочности), наблюдаемые в течение всего последующего времени после окончания воздействия ЭМП. Авторами было высказано предположение, что вышеуказанные изменения механических свойств являются результатом образования в материале “мелкозернистой, изотропной, бездефектной структуры”, возникшей в результате воздействия ЭМП. Данный эффект, приводящий, по мнению авторов, к улучшению микроструктуры металла, наблюдался как при раздельном (неодновременном), так и одновременном приложении механической нагрузки (за пределом текучести) и воздействию ЭМП к образцу и имел устойчивый характер (сохранялся все время после окончания действия импульсом ЭМП).

В дальнейшем был проведен ряд экспериментальных исследований с целью системного изучения ЭЭМ [25, 26] для традиционных материалов. В этих экспериментах было установлено, что, в отличие от отжига или интегрального разогрева электротокком, которые приводят к увеличению размера зерен во всем объеме изделия, при воздействии ВЭМП происходит локальное уменьшение среднего размера зерна, улучшение его фактора формы при сохранении текстуры предшествующей деформации. Были экспериментально выделены определяющие параметры импульсного воздействия ЭМП, получены зависимости, связывающие увеличение ресурса пластичности и этих параметров и т.д.

В работах [26, 27] высказано предположение, что микродефекты (микропоры и микротрещины), возникшие и развившиеся при пластическом деформировании и являющиеся центрами рекристаллизации, залечиваются в процессе воздействия ВЭМП. Хотя сами микромеханизмы залечивания были не понятны авторам и еще не подтверждены экспериментально, однако из общих соображений было ясно, что такое залечивание микродефектов должно

привести к наблюдаемому увеличению ресурса пластичности (без потери в прочности материала).

В настоящее время эту гипотезу о залечивании дефектов и улучшении свойств материалов под действием ВЭМП стало в целом возможно перенести в разряд экспериментально наблюдаемого [28–44]. Эти эксперименты свидетельствовали, что под воздействием ЭМП в поликристаллических металлах и сплавах происходит трансформация больших микропор и микротрещин в меньшие, приводящая к восстановлению сплошности и уменьшению поврежденности (пористости).

*3.2. Аддитивные материалы.* Напротив, изучению воздействия импульсным ЭМП на аддитивные материалы уделяется значительно меньше внимания, несмотря на очевидную актуальность проблемы постобработки, улучшающей свойства таких материалов. Библиография содержит незначительное число статей, описывающие влияние тока различной плотности на механические характеристики материалов, изготовленных аддитивными методами.

В работе [8] рассматривается воздействие импульсным ЭМП на образцы толщиной 2.5 мм, изготовленных методом СЛП из двух типичных материалов AlSi10Mg сплава и из стали 316L. Направление выращивания образцов совпадает с направлением приложения растягивающей силы к образцу.

В образцах из стали 316L индуцировался ток с величиной средней плотности  $0.81 \text{ кВ/мм}^2$ , количество импульсов – от 5 до 10, длительность одного импульса –  $10^{-2} \text{ с}$ , периодичность импульсов  $\sim 20 \text{ с}$ . В ходе электроимпульсного воздействия, по данным работы, образцы разогревались в течение 0.2 с до температуры более  $800^\circ\text{C}$ , после чего остывали при нормальных условиях без дополнительного теплоотведения. Поскольку в данных экспериментах форма импульса тока напрямую не регистрировалась (электроимпульсная обработка осуществлялась на универсальной машине Gleeble@3500/3800), то установить по данным, приведенным в статье, удельную электромагнитную энергию, рассеянную в материале при прохождении одного импульса электрического тока, не представляется возможным. В то время как эти данные представляют значительный интерес для исследования. Рассеянную энергию можно оценить исходя из предоставленных данных о температуре нагрева образца в предположении адиабатичности процесса нагрева. Откуда получим, что величина удельной рассеянной электромагнитной энергии в образце с учетом потерь на лучистый теплообмен достигала  $q = 3.5\text{--}3.8 \times 10^9 \text{ Кг/м}^3$ , при этом в расчетах использовали плотность стали  $\rho = 8 \times 10^3 \text{ Кг/м}^3$ , и теплоемкость  $c = 500 \text{ Дж/(Кг} \cdot \text{К)}$ . Однако нужно заметить, что при длительности импульса порядка  $10^{-2} \text{ с}$  рассматривать процесс как адиабатический не совсем корректно. К сожалению, авторы не исследуют изменения механических характеристик аддитивной стали 316L после такого электроимпульсного воздействия, но проводят металлографические и EBSD исследования. В результате этого металлографического исследования на карте локальных искажений зерен в области шейки удалось на качественном уровне констатировать снижение химической микросегрегации (размытие границ ванн расплава) без значительного изменения плотности дислокаций в зернах, о чем свидетельствуют карты локальных искажений зерен, приведенные авторами. Аналогичные

изменения микроструктуры из практики отжига [3] обычно приводят к снижению предела прочности и увеличению ресурса пластичности. Нужно отметить, что наблюдаемые эффекты имели место только в образце, получившем 10 импульсов. В образце, получившем 5 импульсов, подобные эффекты не наблюдались.

В образцах из AlSi10Mg, изготовленных методом СЛП, индуцировались токи с плотностью 1.38–1.98 кА/мм<sup>2</sup>, количество импульсов – от 15 до 100, длительность одного импульса – 10<sup>-2</sup> с, периодичность импульсов ~ 10 с, внутри которых образцы остывали до температуры окружающей среды. Аналогично с экспериментом на образцах 316L, установить точную форму импульса невозможно. Однако в результате во всех случаях было достигнуто увеличение пластичности материалов (увеличение относительного удлинения и уменьшение предела текучести при одновременном уменьшении предела прочности). Авторы одновременно наблюдают значительную гомогенизацию богатых кремнием ячеистых междендритных структур, которая схожим образом возникает во время процесса отжига, и связывают увеличение ресурса пластичности в том числе с данным фактом.

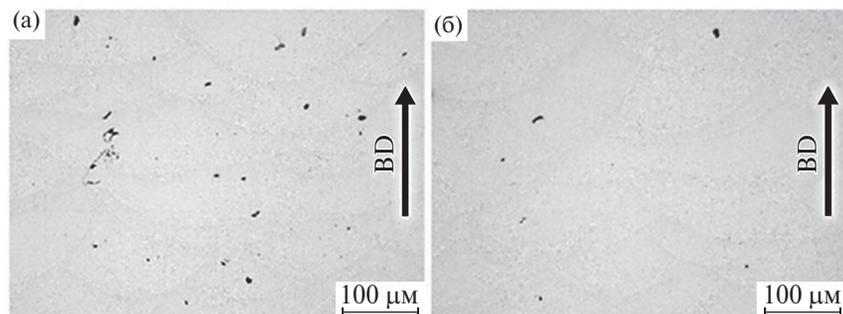
Было также замечено, что изменения микроструктуры (формы, размеров зерен и внутризеренных структур) и механических характеристик при рассматриваемом воздействии были очень чувствительны к приложенной плотности тока и количеству электрических импульсов. В заключение авторы полагают, что полученные ими результаты показывают, что электроимпульсное воздействие может обеспечить гораздо более быстрый и контролируемый метод модификации микроструктуры СЛП-материалов, чем традиционные методы отжига.

В работе [9] одновременно исследовались относительное удлинение, усталостные свойства и коррозионная стойкость AlSi10Mg сплава, полученного методом СЛП. Образцы изготавливались так, что ось выращивания была параллельна направлению растяжения. При выращивании каждый слой развернут на 67° относительно предыдущего. Образцы обрабатывались индуцированными ЭМП током плотностью  $j=0.8$  кА/мм<sup>2</sup> и длительности 10 мс. Форма импульсов была прямоугольной. После каждой пары разнонаправленных импульсов следовал период остывания в обычных условиях длительностью 500 мс. Суммарное число импульсов – 2000.

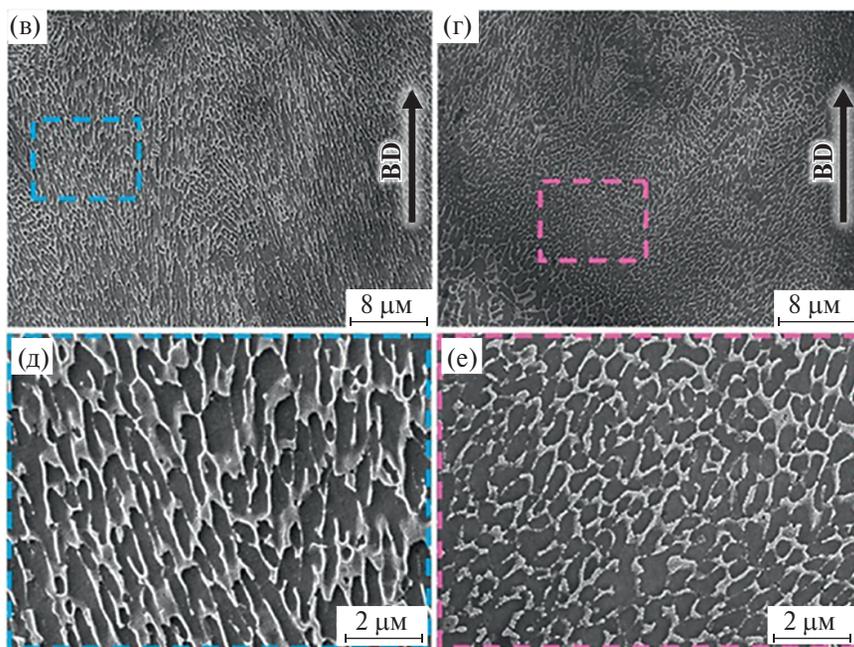
В результате эксперимента авторы на качественном уровне констатируют залечивание технологических пор, возникших при выращивании образцов. Авторы объясняют залечивание микропор эффектом концентрации тока, возникающей при огибании током полостей (пор). В подтверждение данного факта приводятся два оптических снимка в масштабе 100 мкм (см. рис. 1) шлифов двух образцов, один из которых прошел электроимпульсную обработку, а другой – нет.

Из сравнения данных изображений авторы делают вывод о снижении пористости технологических полостей в деталях. Иных доказательств залечивания микродефектов в работе не приводится.

Аналогично [8] в [9] наблюдается гомогенизация и сглаживание структур кремния, улучшение их распределения по зернам алюминия, в подтверждение



**Рис. 1.** Оптические снимки двух разных образцов в области максимального растягивающего напряжения (шейки). (а) Необработанный образец, (б) образец, прошедший электроимпульсную обработку [9].



**Рис. 2.** Оптические снимки характерной микроструктуры образцов до электроимпульсной обработки (в, г) и после (д, е) [9].

чему авторы приводят оптические снимки двух различных областей одного образца до и после электроимпульсной обработки. См. рис. 2.

Данная гомогенизация, по мнению авторов [9], значительно влияет на механические свойства образцов в части увеличения как предела прочности, так и предельной пластической деформации до разрушения (ресурса пластичности).

В самом деле, при проведении теста на растяжение обработанные ЭМП образцы показали рост ресурса пластичности на ~20% (точных данных по данному показателю авторы не приводят), в то же время предел прочности сократился всего лишь на 1.2%, таким образом, было высказано предположение, что данный метод можно использовать для увеличения ресурса пластичности без существенного влияния на показатели прочности.

Дополнительно отмечается уменьшение среднего размера зерна на ~5%, а плотность дислокаций снизилась, о чем свидетельствует снижение на 13.3% параметра GND, рассчитанного на основании приведенных карт локальных искажений.

Применительно к усталостным свойствам образцов из сплава AlSi10Mg, выращенных при помощи технологии СЛП, авторы отмечают, что они не уступают по средним характеристикам аналогичным образцам, улучшенным при помощи отжига, делая отсылку к работе [45]. Вместе с тем констатируется, что обработка ЭМП позволяет сократить стандартное отклонение числа циклов до разрушения на 34.8%, увеличить среднее число циклов до разрушения на 49.4%, повысив минимальное на 164.4%.

Дополнительно ко всему сказанному выше можно отметить улучшение антикоррозийных свойств образцов из сплава AlSi10Mg после электроимпульсной обработки по сравнению с необработанным образцом. Данные улучшения авторы связывают с изменением интегральных характеристик образцов, характеризующих развитие коррозии, после электроимпульсной обработки, а именно увеличением положительного потенциала разомкнутой цепи, потенциала коррозии, а также меньшего тока коррозии.

Представляется интересным сопоставить результаты изменений механических характеристик обработанных образцов AlSi10Mg в [8] и [9], так как в работах эксперименты имеют сопоставимые исходные данные (порядок размеров, плотности тока, величин удельной рассеянной энергии), см. табл. 1.

Величины удельной рассеянной энергии для образцов AlEpulse\_1 – AlEpulse\_5 рассчитаны на основании данных о нагреве образца с поправкой 10% на потери, в т.ч. за счет излучения [46].

При этом в расчетах принималось: плотность  $\rho = 2.66 \times 10^3 \text{ Кг/м}^3$  и теплоемкость  $c = 920 \text{ Дж/(Кг} \cdot \text{К)}$  [47]. Величина удельной рассеянной энергии для образца ЕРТ1 рассчитана на основании закона Джоуля–Ленца, исходя из величины удельного сопротивления для данного алюминиевого сплава  $\Omega = 8.88 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  [48]. Также при расчетах предполагалось, что процесс нагрева адиабатический (что является некоторым упрощением, поскольку время воздействия значительно – 0.02 с). Стоит обратить внимание, что по мере увеличения плотности тока и, как следствие, средней температуры нагрева образцов ресурс пластичности имеет тенденцию к росту, а пределы прочности и текучести снижаются. При этом для образцов EPN4 и EPN5 средние максимумы температур, достигаемых в момент воздействия ЭМП (365 и 377 °С соответственно) превышают температуру отжига (300 °С), что позволяет предполагать наличие схожих отжигу процессов в образцах. Отметим, что исследователи регистрируют температуру на термопарах, расположенных по краям образцов. Поэтому максимумы температуры на термопарах

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики результатов экспериментов [8] и [9]

Материал образцов: AlSi10Mg		$j$ , кА/мм <sup>2</sup>	$n$ , шт.	$\Delta YS$ , %	$\Delta UTS$ , %	$\Delta EL$ , %	$Q$ , $\times 10^8$ Дж/м <sup>3</sup>
[8] Noel	Отжиг (2 ч 300°C)	–	–	–46.5%	–33.7%	549.1%	–
	AlEpulse_1	1.32	100	–22.3%	–2.6%	53.8%	4.75
	AlEpulse_2	1.4	20	–16.3%	–3.4%	9.9%	6.07
	AlEpulse_3	1.53	20	–19.5%	–9.7%	22.6%	7.28
	AlEpulse_4	1.68	100	–45.6%	–18.6%	187.3%	9.31
	AlEpulse_5	1.78	20	–24.2%	–13.1%	120.8%	9.63
[9] Ling Xue	EPT1	0.8	2000	+1% (оценка)	–1.2%	~23.9%	5.71

*Примечание.*  $\Delta YS$ , % – изменение предела текучести.  $\Delta UTS$ , % – изменение предела прочности.  $\Delta EL$ , % – изменения ресурса пластичности.  $Q$ ,  $\times 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> – оценка удельной рассеянной энергии одного импульса.

фиксируются с задержкой 0.01–0.02 с с момента прохождения импульса, за которое образец в наиболее нагретых зонах уже теряет тепло. Это означает, что температура в зонах наибольшего нагрева превышает рассчитанные выше 365 и 377 °С соответственно.

В работе [9] авторы не приводят данных по изменению температуры во время воздействия электрического импульса. Однако величину удельной рассеянной электромагнитной энергии в образце можно рассчитать с рядом допущений. При удельном сопротивлении  $\Omega = 8.88 \times 10^{-6}$  Ом·см удельная рассеянная электромагнитная энергия составляет  $q = 0.57 \times 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, что с учетом потерь на лучистый теплообмен должно приводить к нагреванию образцов при  $\gamma = 2.66 \times 10^3$  Кг/м<sup>3</sup>,  $c = 920$  Дж/(Кг·К) на 210–215 К за каждый импульс. Импульсы следуют парами с промежутком 0.01 с, за которые образец не успевает остыть, а элементарные расчеты показывают, что за пару импульсов температура может значительно увеличиться и превысить температуру отжига (>300 °С) для сравнения взят режим отжига из [8]). Более того, между каждой парой импульсов следует промежуток 0.5 с, в течение которого образец, по словам авторов, остывает. При сопоставимых порядках размера образцов, исходя из данных о динамике температуры образцов в работе [8], за время 0.5 с образец в работе [9] должен остывать на не более чем 100 К, что не позволяет ему достичь температуры окружающей среды. Это утверждение также подтверждается оценками времени полной релаксации температуры в несколько секунд в соответствии с законом Фурье.

Вышеприведенные оценки свидетельствуют о том, что в ходе электроимпульсной обработки температура образца, по-видимому, достигает и превышает температуру классического высокотемпературного отжига, который, таким образом, фактически и реализуется. Вместе с тем необходимо отметить, что, по данным [9], предел прочности (–1.2%) и предел текучести (+~1%) практически не изменились. При этом ресурс пластичности вырос на ~23.9%.

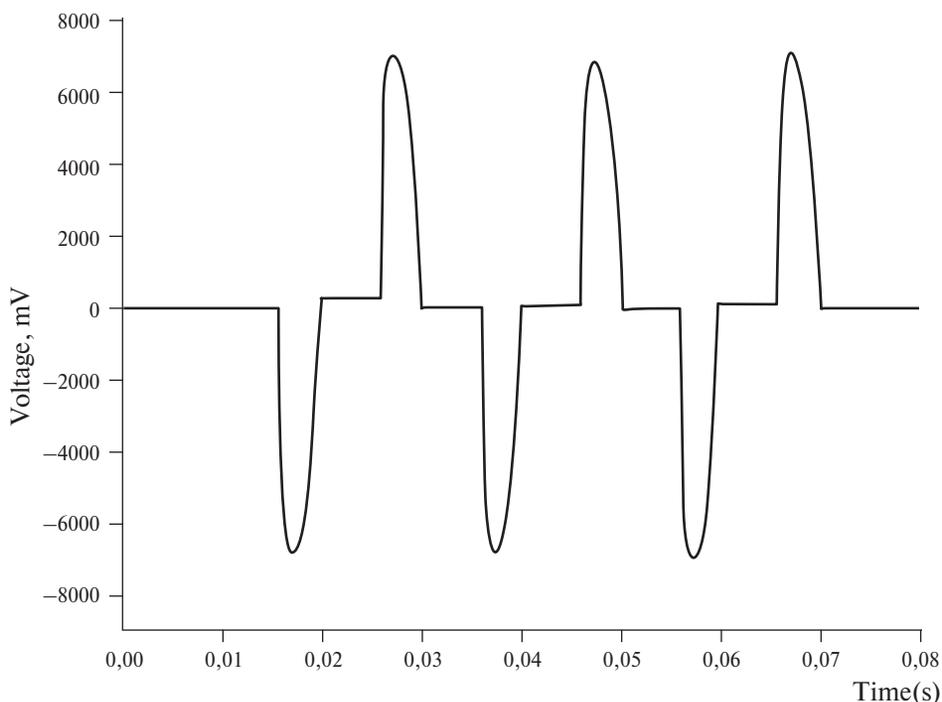
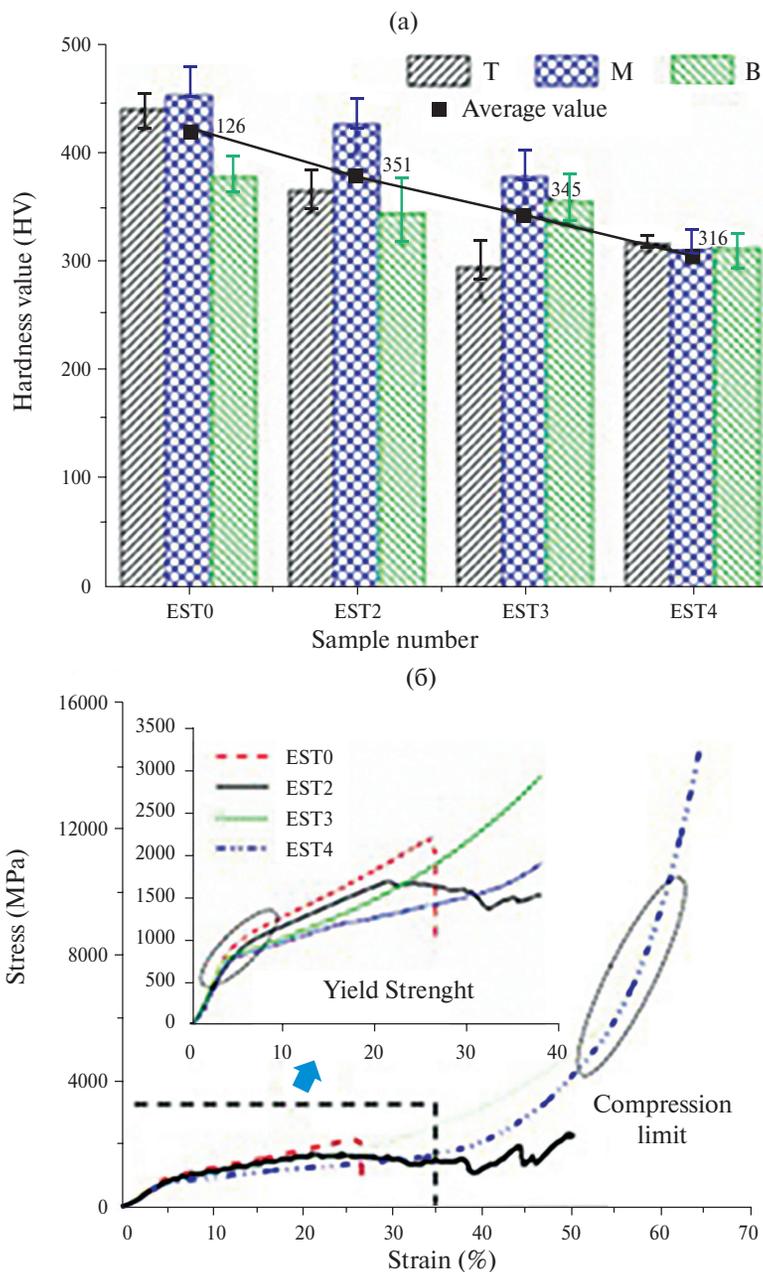


Рис. 3. Общая форма импульса в экспериментах [66, 67].

Столь значимый выигрыш в пластичности при фактическом отсутствии потерь в прочности является не типичным для случаев рассеивания подобного количества удельной энергии в образцах. Из работы до конца не ясно, являются ли приведенные выше данные по динамике механических свойств средними по выборке или показателями теста на растяжение одного образца. Во втором случае, по-видимому, в будущих экспериментах имеет смысл проверить данную статистику на выборке.

Применительно к тематике исследования также целесообразно рассмотреть работы [66] и [67], где исследовались в том числе механические свойства образцов из Ti-55531, изготовленных аддитивным методом. В [66] тестировались цилиндрические образцы  $\varnothing 4.5 \times 10$  мм, изготовленные методом прямого лазерного выращивания (DED). Линия выращивания – вертикальная с чередованием направления печати, лежит в плоскости приложения напряжения. Образцы подвергались воздействию ЭМП в интервалах от 0.02 до 0.04 с в соответствии с формой импульса, указанной на рис. 3.

В результате на качественном уровне отмечаются твердотельные фазовые переходы, приводящие к более равномерному пространственному распределению  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы Ti, что, по мнению авторов, способствует увеличению ресурса пластичности и снижению прочности. Также обнаружена рекристаллизация с сохранением первоначальной текстуры и небольшие изменения в ориентации зерен. Авторы также выделяют факт миграции атомов Al и V,



**Рис. 4.** (а) Изменения показателей твердости образцов HV и (б) механических свойств (предела текучести, предела прочности, ресурса пластичности) для образцов с различным временем воздействия ЭМП. EST0 – образец, на который не воздействовали ЭМП. Соответственно время воздействия ЭМП для EST2 – 0.02 с, EST3 – 0.03 с, EST4 – 0.04 с [66].

Mo, Cr (упрочняющих  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы Ti соответственно) между фазами Ti и нормализацию их распределения.

Вместе с тем необходимо отметить, что твердость образцов значительно ухудшалась при увеличении времени воздействия ЭМП, в то время как показатель ресурса пластичности (при сжатии) существенно возрастал. Графики ниже (см. рис. 4) демонстрируют снижение показателей твердости в различных точках образцов и динамику механических характеристик.

К сожалению, авторы уделяют пластическим свойствам образцов незначительное внимание и не приводят точных данных, отмечая, однако, что с увеличением времени воздействия ЭМП увеличивается ресурс пластичности (в два раза с 26 до 52% между необработанным образцом и образцом с временем воздействия ЭМП – 0.04 с), вместе с тем снижается предел текучести с 901 до 799 МПа. Точных данных по пределу прочности образцов не предоставлено.

В результате в [66], аналогично [8], предлагалось использовать электроимпульсное воздействие как эффективный метод управления микроструктурой аддитивного материала и более простую и дешевую альтернативу термомеханическим методам.

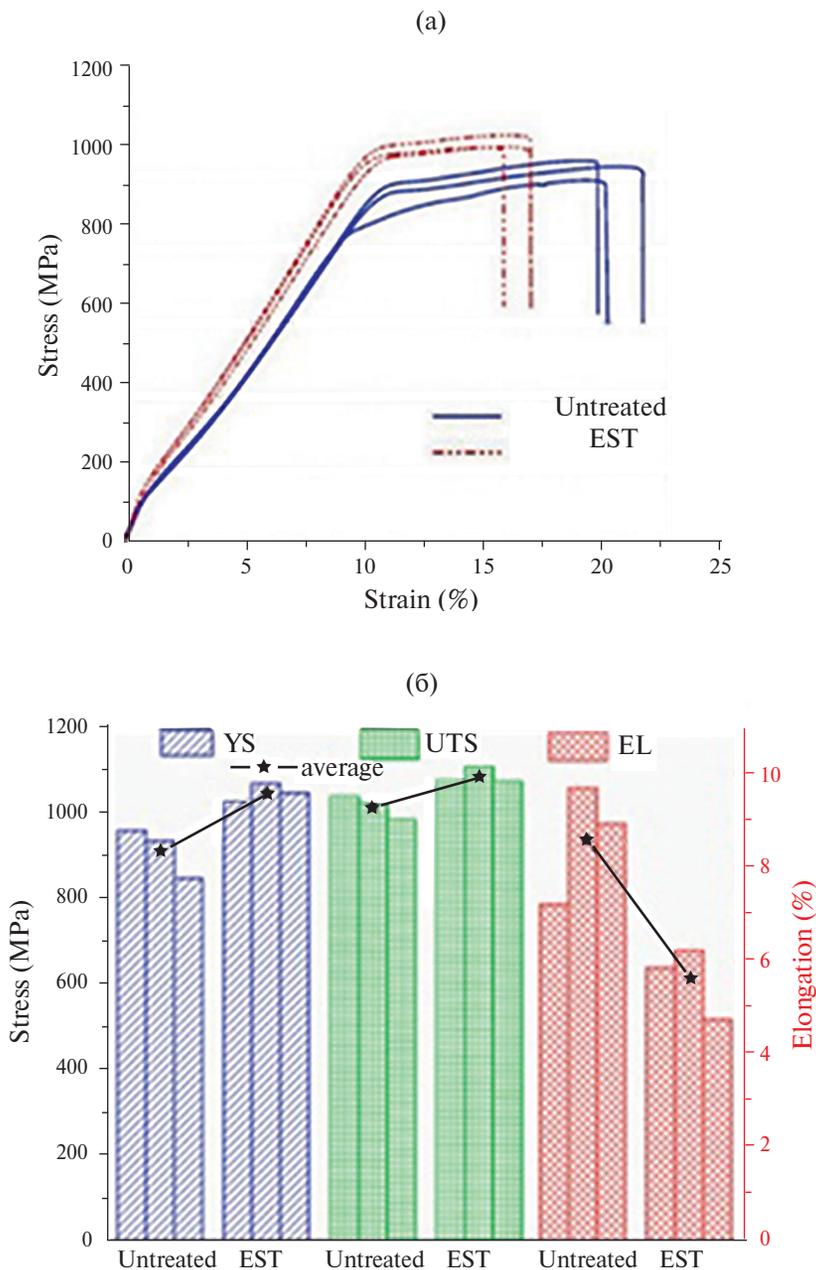
В работе [67] образцы из Ti-55531 с размерами  $70 \times 13 \times 2$  мм, изготовленные при помощи технологии прямого лазерного осаждения (LMD), подвергались воздействию ЭМП, индуцирующих относительно низкие плотности тока, при этом форма импульса соответствовала указанной на рис. 3. Авторы отдельно отмечают, что тестируют выборку из трех образцов.

В результате эксперимента в образцах на протяжении 0.03 с индуцировали токи плотностью  $j = 3.5$  А/мм<sup>2</sup>, что в результате вычислений приблизительно соответствует величинам удельной рассеянной энергии в образцах до  $q = 7.74 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Авторы отмечают, что в ходе такого электроимпульсного воздействия температура образцов достигала и превышала температуру, необходимую для осуществления фазовых трансформаций  $\beta \rightarrow \alpha$ , что приводит к повышению содержания  $\alpha$ -фазы в обработанных образцах. Кроме этого, после электроимпульсной обработки авторы отмечают уменьшение среднего размера зерен  $\beta$ -фазы с 112.9 до 97.1 мкм, а ориентация зерен на карте, полученной методом ДОЭ, носит более случайный характер.

С точки зрения изменения механических характеристик образцов необходимо отметить, что в результате электроимпульсной обработки, индуцирующей токи относительно низкой плотности, наблюдается повышение хрупкости материала (снижение показателя предельной деформации до разрушения) на ~35% вместе с ростом предела текучести на 14.6% и предела прочности на 7% в средних величинах. (см. рис. 5).

В заключение авторы выражают уверенность, что электроимпульсная обработка является перспективным направлением в части улучшения свойств на этапе пост-производства.

Для целей настоящей статьи необходимо зафиксировать, что токи низкой плотности для некоторых сплавов могут оказывать обратное воздействие на свойства материалов, по сравнению с токами высокой плотности, повышая их хрупкость, вместе с тем увеличивая прочность и упругость.



**Рис. 5.** (а) Кривые напряжения-деформации для необработанных (синие) и обработанных ЭМП (красные) образцов. (б) Сравнение средних характеристик предела текучести (YS), предела прочности (UTS) и ресурса пластичности (EL) обработанных (EST) и необработанных (Untreated) образцов [67].

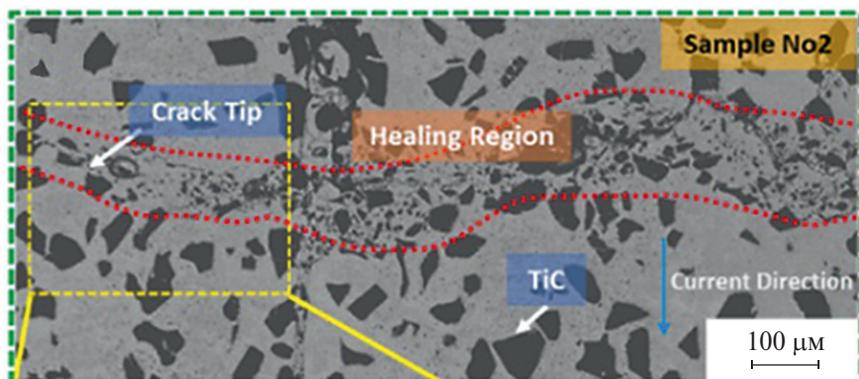


Рис. 6. Оптическое изображение микроструктуры в области залеченной макротрещины в [69].

В работе [69] рассматривается процесс залечивания макротрещины длиной 9 мм в пластине  $64 \times 20 \times 4$  мм из дисперсного композиционного материала TiC/316L, изготовленного методом направленного энергетического напыления на основе лазера (DED-LB). При помощи одновременного воздействия импульсами тока, индуцированного ЭМП, и сжимающего напряжения трещину удалось залечить.

Сила тока возростала каждые 15 импульсов при длительности этапа 30 с, что было необходимо в связи с постепенным залечиванием трещины, уменьшением ее длины. Таким образом, плотности тока в образцах постепенно возростала от 0.96 до 1.87 кА/мм<sup>2</sup>, будучи постоянной в пределах каждого из 5-ти этапов.

При качественном анализе микроструктура залеченной области оказалась состоящей из измельченных частиц TiC и повторно кристаллизованных мелких зерен аустенита, что свидетельствует о плавлении материала в области вершины трещины и сваривании берегов макротрещины расплавленным металлом (см. рис. 6).

В заключение авторы выражают уверенность в том, что использование импульсного ЭМП является перспективным направлением для дальнейшего исследования и использования в задачах восстановления целостности материалов.

Для наших же целей следует отметить, что физически процессы залечивания микродефектов внутри образцов и макротрещин в пластинах различаются. В то же время термомеханические процессы вблизи острых вершин как макро-, так и внутренних микродефектов близки по природе на начальном этапе воздействия ЭМП. А для макродефектов (в т.ч. трещин) данные процессы можно удобным образом наблюдать в экспериментах, схожих с [69] (в отличие от внутренних микродефектов, изменения которых наблюдать существующими методами практически невозможно).

В работе [70] описан эксперимент по улучшению механических свойств образцов из сплава Ti-6Al-4V, изготовленных методом СЛП. Относительное удлинение, предел прочности Ti-6Al-4V образцов были значительно увеличены

в следствие электроимпульсного воздействия на образцы  $15 \times 50 \times 0.24$  мм, однократно индуцировавшим в образцах в течение 15 с токи с плотностями  $0.42\text{--}0.53$  кА/мм<sup>2</sup>. В ходе эксперимента, в зависимости от плотности тока, образцы нагревались от 630 до 760 °С соответственно.

В результате, наряду с незначительными изменениями решетки  $\alpha$ -фазы Ti, наблюдалось значимое округление (снижение показателя соотношения сторон) зерен  $\beta$ -фазы в плоскости параллельно оси выращивания. В плоскости, перпендикулярной оси выращивания зерна  $\beta$ -фазы, длина зерен выросла, а динамика соотношения сторон не позволяет однозначно оценить влияние тока на данный показатель.

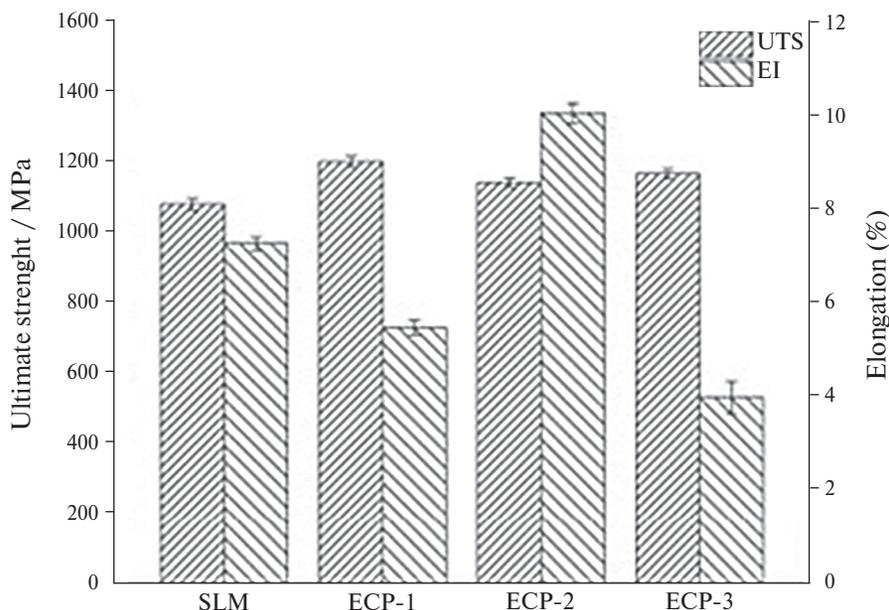
Вторым важным качественным фактом, обнаруженном в ходе металлографических исследований, является наблюдаемое снижение среднего размера  $\alpha'$  мартенситов, которое происходит за счет дробления крупных структур на более мелкие, что, по мнению авторов, объясняется концентрацией энергии на дислокациях крупных  $\alpha'$  мартенситов с последующим плавлением и дроблением. Так, в образце ЕСР-2 (плотность тока  $0.48$  кА/мм<sup>2</sup>) количество крупных (с длиной главной оси  $>15$  мкм и средних (с длиной главной оси  $6\text{--}15$  мкм)  $\alpha'$  мартенситов сократилось более чем в два раза при соответствующем увеличении числа малых ( $0\text{--}6$  мкм).

Примечательно, что в данной работе для всех образцов удалось значительно повысить предел прочности на  $8.1\text{--}13.65\%$ . Кроме того, ресурс пластичности образца ЕСР-2 (плотность тока  $0.48$  кА/мм<sup>2</sup>) из образцов был существенно (на  $34.67\%$ ) увеличен, по сравнению с необработанным. Вместе с тем ресурс пластичности образцов ЕСР-1 (плотность тока  $0.42$  кА/мм<sup>2</sup>) и ЕСР-3 (плотность тока  $0.53$  кА/мм<sup>2</sup>) снизился на  $26.67$  и  $46.67\%$  соответственно (см. рис. 7).

Авторы наблюдают специфические твердотельные фазовые переходы, свойственные данному сплаву, а также отмечают рекристаллизацию мартенситов. В образце ЕСР-2, показавшем наилучшие результаты в тесте на растяжение, указанные выше наблюдения оказались наиболее выраженными. Необходимо отметить, что большинство режимов отжига Ti-6Al-4V предполагают температурный режим  $550\text{--}1050$  °С [16], таким образом, в ходе воздействия ЭМП температура образцов достигала и превышала температуру отжига, что, по всей видимости, приводило к схожим процессам в материале. Вместе с тем полученное в экспериментах одновременное значительное увеличение предела прочности и ресурса пластичности не характерно как для отжига, так и для электроимпульсной обработки.

В работе [71] исследовались цилиндрические образцы  $\varnothing 10 \times 15$  мм из сплава Ti-6Al-4V, полученные методом сплавления электронным пучком (ЕВМ). Образцы подвергались одновременному воздействию тока, индуцированного ЭМП с величиной  $1.9$  кА на площади контакта  $6.15$  мм<sup>2</sup>. и прижимающим усилием в  $205\text{Н}$ . Таким образом, плотность тока под электродом-штампом изменялась от  $308.5$  до  $24.2$  А/мм<sup>2</sup>. Использование медных электродов стимулировало быстрое отведение тепла через зону контакта. Длительность электрических импульсов варьировалась и составляла  $120, 180$  и  $240$  мс.

В результате в приповерхностном слое глубиной  $1.3\text{--}1.7$  мм (в зависимости от времени воздействия ЭМП) наблюдались схожие с уже отмеченными



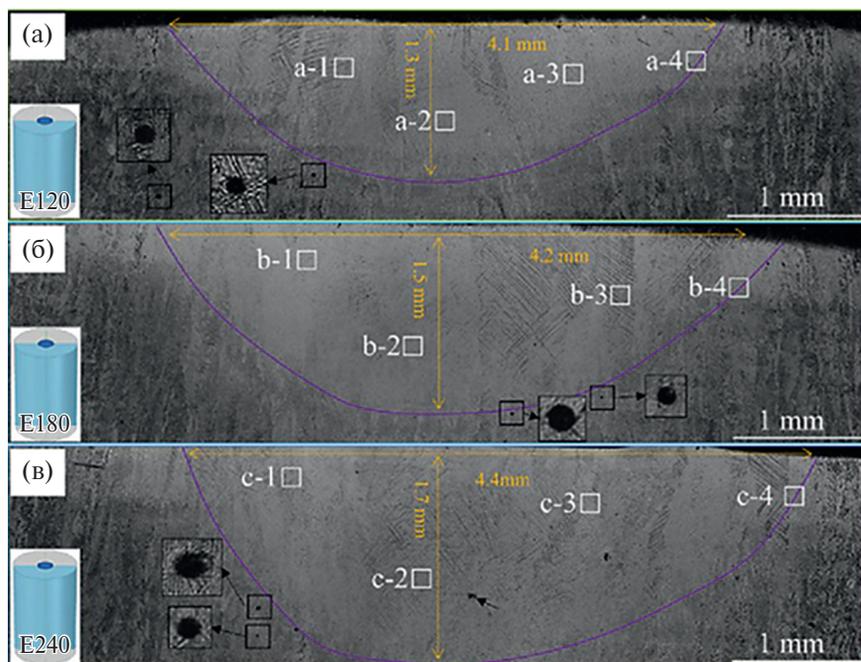
**Рис. 7.** Сравнение предела прочности и ресурса пластичности необработанного образца (SLM) и образцов в результате трех различных режимов электроимпульсной обработки (ECP-1 плотность тока 0.42 кА/мм<sup>2</sup>, ECP-2 плотность тока 0.48 кА/мм<sup>2</sup>, ECP-3 плотность тока 0.53 кА/мм<sup>2</sup>) [70].

в работе [70] эффекты дробления крупных мартенситов на мелкие. Вместе с тем на качественном уровне наблюдается положительная динамика в части залечивания пор. Так, в поверхностном под штампом слое образцов (области эффективного воздействия), подвергавшихся воздействию тока 120 и 180 мс, пор не обнаружено, что, впрочем, не может однозначно подтвердить факт их полного залечивания, как и факт первоначального их наличия в данных областях (см. рис. 8). В образце со временем воздействия 240 мс поры оказались существенно меньше, чем в незатронутой воздействием ЭМП области материала. Однако само наличие пор в обработанных областях ставит под сомнение факт их залечивания в образцах с меньшей длительностью воздействия ЭМП.

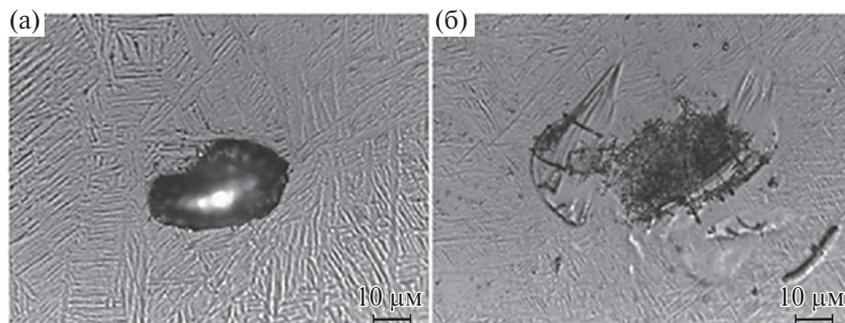
Форма пор в залеченной области изменяется в сторону сглаживания их границ. Для сравнения приводятся фотографии схожих по размеру микропор в зоне воздействия ЭМП и вне указанной зоны (см. рис. 9).

Авторы проводят математическое моделирование динамики температуры при помощи JMatPro®, подтвержденное измерениями термометров на внешнем контуре образцов. По данным моделирования пиковые температуры в образцах достигали отметок 900–1118 °С, скорость нагрева – более 4800 °С/с, скорость остывания – более 3259 °С/с. Авторы полагают, что такие температурные изменения подтверждают возможности трансформации β-фазы в α'-фазу, а также возможность возникновения мартенситов.

В залеченных зонах затем был проведен замер микротвердости, которые показали значительное упрочнение залеченных областей (320–350 HV<sub>0,2</sub>)

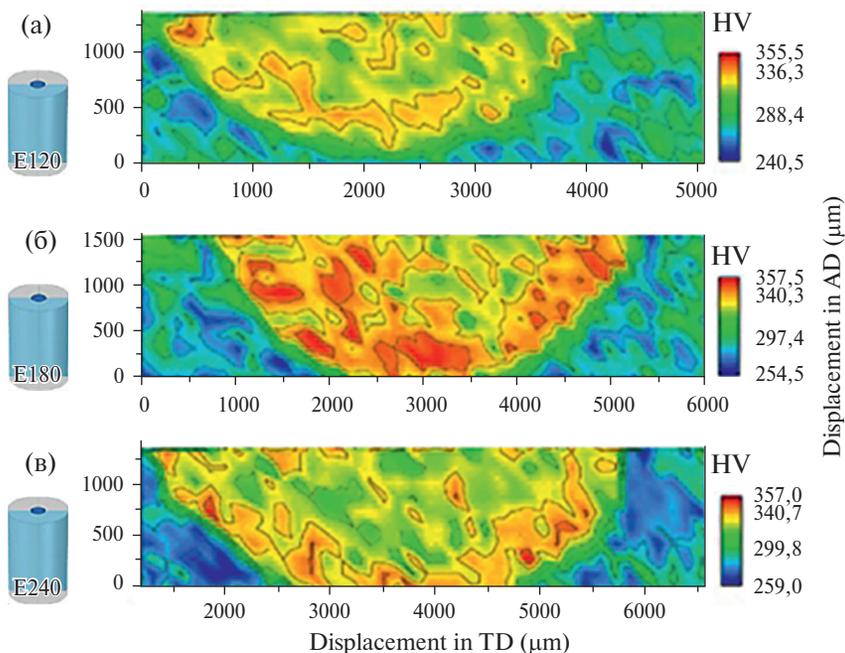


**Рис. 8.** Снимки сечений образцов после воздействия ЭМП длительностью (а) 120, (б) 180 и (в) 240 мс [71]. Сечение образцов схематично показано в левом нижнем углу каждого снимков.



**Рис. 9.** Оптические фотографии схожих по размерам пор в зонах максимального воздействия ЭМП под электродом (а) и вне данной зоны (б), [71].

и границы ( $\sim 290 HV_{0,2}$ ), по сравнению с незатронутыми заживлением областями ( $\sim 260 HV_{0,2}$ ), что, по мнению авторов, подтвердило эффект эволюции микроструктуры в заживленных областях, проявившийся в уменьшении размера зерен и увеличении плотности дислокаций. Площадь зоны упрочнения увеличивается с ростом длительности воздействия ЭМП, однако диапазон изменения твердости практически не меняется (см. рис. 10).



**Рис. 10.** Распределение твердости (HV) в сечении образцов в зависимости от длительности воздействия ЭМП (а) 120 мс, (б) 180 мс и (в) 240 мс, [71].

В заключение авторы выражают уверенность, что электроимпульсное воздействие является перспективным направлением улучшения как пластических, так и усталостных свойств материалов, изготовленных аддитивными методами.

**4. Заключение.** Проблема улучшения механических свойств аддитивных материалов при воздействии на них сильными электромагнитными полями (ЭМП) исследована незначительно и только экспериментально.

Проведенные эксперименты не позволяют сделать окончательных выводов об эффективности и, таким образом, целесообразности применения импульсных ЭМП для улучшения макросвойств материала после его аддитивного производства, а также восстановления после его механического деформирования.

Тематика залечивания эксплуатационных дефектов (микро- и мезотрещин, пор и т.п.), вызванных процессом механического деформирования деталей, не исследована и является перспективным направлением для дальнейшей работы. Все изученные на настоящий момент работы посвящены исследованию залечивания технологических дефектов, связанных с процессом аддитивного производства.

Теоретические исследования, в частности моделирование залечивания микродефектов в аддитивных материалах, также не проводились, поэтому остаются до конца не определенными возможные физические механизмы их залечивания.

В вышеприведенных исследованиях, подразумевающих воздействие током высокой плотности, отмечаемые их авторами качественные изменения микроструктуры аддитивного материала (размеры ванн расплава, размер зерна, твердотельные фазовые переходы, гомогенизация компонентов сплава и пр.) связаны, по-видимому, с высокотемпературным интегральным разогревом (отжигом) образцов в ходе воздействия током, а не последствиями воздействия на них кратковременным и интенсивным ЭМП. Поэтому авторы данных исследований отмечают, что применяемые ими методы электроимпульсного воздействия являются более эффективной альтернативой отжигу.

Между тем при импульсном воздействии ЭМП, в особенности при воздействии импульсным высокоэнергетическим ЭМП, когда время воздействия составляет  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  с, термомеханические процессы можно считать адиабатическими. При величинах удельной рассеянной электромагнитной энергии за один импульс в диапазоне  $10^7$ – $10^9$  Дж/м<sup>3</sup> в аддитивных материалах (впрочем, как и в материалах, изготовленных традиционными методами) будут происходить иные эволюционные изменения, нежели при отжиге.

Ожидается, что короткие импульсы высокоэнергетического ЭМП будут одновременно вызывать плавление и высокие сжимающие напряжения в острых вершинах микро- и мезодефектов (трещин и пор). Это будет приводить к залечиванию данных дефектов путем сварки их берегов. Такое уменьшение поврежденности (залечивание или снижение пористости) должно улучшить макроскопические механические свойства аддитивных материалов. Кроме того, есть основания полагать, что иные характеристики микроструктуры (остаточные растягивающие напряжения, размер зерна, искажения кристаллической решетки и т.д.) не ухудшатся. В связи со сказанным выше, представляется, что исследования воздействия именно высокоэнергетическим импульсным ЭМП на аддитивные материалы имеют значительные перспективы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guo Nannan, Leu Ming C.* Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Front. Mech. Eng.* 2013. V. 8. № 3. P. 215–243.  
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
2. *Канищев М.В., Ульев Л.М.* Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати. Москва: Издательский Дом МИСиС, 2023. 352 с.
3. *Dryepondt S., Nandwana P., Fernandez-Zelaia P., List F.* Microstructure and high temperature tensile properties of 316L fabricated by laser powder-bed fusion // *Addit. Manuf.* V. 37. P. 101723.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101723>
4. *Brennan M.C., Keist J.S., Palmer T.A.* Defects in metal additive manufacturing processes // *J. Mater. Eng. Perform.* 2021. V. 30. № 7. P. 4808–4818.  
<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05919-6>
5. *Malekipour E., El-Mounayri H.* Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 95. № 1–4. P. 527–550.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1172-6>

6. *Zhang B., Li Y., Bai Q.* Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // *Chinese J. Mech. Eng.* 2017. V. 30. № 3. P. 515–527.  
<https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>
7. *Khodabakhshi F., Farshidianfar M.H., Gerlich A.P., Nosko M., Trembošová V., Khajepour A.* Effects of laser additive manufacturing on microstructure and crystallographic texture of austenitic and martensitic stainless steels // *Addit. Manuf.* 2020. V. 31. P. 100915.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100915>
8. *Noell P.J., Rodelas J.M., Ghanbari ZN., Laursen Ch.M.* Microstructural modification of additively manufactured metals by electropulsing // *Addit. Manuf.* 2020. V. 33. P. 101128.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101128>
9. *Xue L., Liao Ch., Wu M., Li Q., Hu Zh., Yang Y., Liu J.* Improvement of mechanical properties and corrosion resistance of SLM- $\text{AlSi10Mg}$  alloy by an eco-friendly electric pulse treatment // *J. Clean. Prod.* 2024. V. 439. P. 140864.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140864>
10. *Qin L.Y., Men J.H., Zhang L.S., Zhao S., Li C.F., Yang G., Wang W.* Microstructure homogenizations of Ti-6Al-4V alloy manufactured by hybridselective laser melting and laser deposition manufacturing // *Materials Science & Engineering A.* 2019. V. 759. P. 404–414.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.049>
11. *Nguyen H.D., Pramanik A., Basak A.K., Dong Y., Prakash C., Debnath S. et al.* Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 18. P. 4641–4661.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
12. *Lai Wei-Jen, Ojha Avinesh, Li Ziang, Engler-Pinto Carlos, Su Xuming.* Effect of residual stress on fatigue strength of 316L stainless steel produced by laser powder bed fusion process // *Prog. Addit. Manuf.* 2021. V. 6. № 3. P. 375–383.  
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00164-8>
13. *Elangeswaran Ch., Cutolo A., Muralidharan G.K., de Formanoir Ch., Berto F., Vanmeensel K., van Hooreweder B.* Effect of post-treatments on the fatigue behaviour of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion // *Int. J. Fatigue.* 2019. V. 123. P. 31–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.013>
14. *Zhang M., Sun Ch.-N., Zhang X., Wei J., Hardacre D., Li H.* High cycle fatigue and ratcheting interaction of laser powder bed fusion stainless steel 316L: Fracture behaviour and stress-based modelling // *Int. J. Fatigue.* 2019. V. 121. P. 252–264.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.12.016>
15. *Gel'atko M., Hatala M., Botko F., Vandžura R., Hajnyš J., Šajgalík M., Török J.* Stress relieving heat treatment of 316L stainless steel made by additive manufacturing process // *Materials.* 2023. V. 16. № 19. P. 6461.  
<https://doi.org/10.3390/ma16196461>
16. *Chadha K., Tian Yu., Spray J., Aranas C.* Effect of annealing heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of hot isostatic pressed 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion // *Metals.* 2020. V. 10. № 6. P. 753.  
<https://doi.org/10.3390/met10060753>
17. *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. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 590 с.

18. *Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г.* Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 117–129.
19. *Liverani E., Lutey A.H.A., Ascari A., Fortunato A.* The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM) // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V. 107. № 1–2. P. 109–122.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05072-9>
20. *Röttger A., Geenen K., Windmann M., Binner F., Theisen W.* Comparison of microstructure and mechanical properties of 316 L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material // *Mater. Sci. Eng. A*. 2016. V. 678. P. 365–376.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.012>
21. *Grech I.S., Sullivan J.H., Lancaster R.J., Plummer J., Lavery N.P.* The optimisation of hot isostatic pressing treatments for enhanced mechanical and corrosion performance of stainless steel 316L produced by laser powder bed fusion // *Addit. Manuf.* Elsevier. 2022. V. 58. P. 103072.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103072>
22. *Leuders S., Lienke T., Lammers S., Tröster T., Niendorf T.* On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting – The role of ductility // *J. Mater. Res.* 2014. V. 29. № 17. P. 1911–1919.  
<https://doi.org/10.1557/jmr.2014.157>
23. *Chao Qi, Thomas S., Birbilis N., Cizek P., Hodgson P.D., Fabijanic D.* The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel // *Mater. Sci. Eng. A*. 2021. V. 821. P. 141611.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141611>
24. *Троицкий О.А., Лихтман В.И.* Влияние анизотропии электронного и гамма-излучения на деформацию монокристаллов цинка в хрупком состоянии // *Докл. Акад. наук СССР*. 1963. Т. 148. № 2. С. 332–334.
25. *Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С.* Влияние локально-неоднородного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // *Изв. АН СССР. Металлы*. 1984. № 4. С. 184–187.
26. *Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С.* О процессе пластической деформации в импульсном электромагнитном поле некоторых проводящих материалов // *Изв. АН СССР. Сер. Металлы*. 1985. № 1. С. 159–167.
27. *Беклемишев Н.Н., Кукуджанов В.Н., Порохов В.А.* Пластичность и прочность металлических материалов с учетом импульсного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля. Препринт № 372. ИПМ АН СССР. 1989. С. 56.
28. *Клюшников В.Д., Овчинников И.В.* Плоская задача о воздействии мгновенного точечного источника тепла // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1988. № 4. С. 118–122.
29. *Conrad H.* A study into the mechanism(s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue. Final Report ARO Proposal Number 23090-MS, ARO Funding Document DAAL03-86-K-0015, U. S. Army Research Office, North Carolina. 1989. 52 p.
30. *Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Косинов Д.А., Громов В.Е.* Повышение многоциклового усталости титанового сплава при токовом воздействии // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019. Т. 15. № 5 (173). С. 213–218.

31. *Кукуджанов К.В., Ченцов А.В.* Исследование влияния импульсного электромагнитного поля на заживление поврежденности в цинке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2020. № 61. С. 40–49.  
<https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.61.05>
32. *Кукуджанов К.В., Ченцов А.В.* О заживлении пористости в металле под действием высокоэнергетического электромагнитного поля // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния. 2020. № 2 (44). С. 116–131.  
<https://doi.org/10.37972/chgpu.2020.44.2.012>
33. *Ren X., Wang Zh., Fang X., Song H., Duan J.* The plastic flow model in the healing process of internal microcracks in pre-deformed TC4 sheet by pulse current // Mater. Des. 2020. V. 188. P. 108428.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108428>
34. *Xu W., Yang Ch., Yu H., Jin X., Yang G., Shan D., Guo B.* Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // J. Magnes. Alloy. 2021. V. 9. № 5. P. 1768–1781.  
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.08.022>
35. *Кукуджанов К.В.* Воздействие короткоимпульсного высоко энергетического электромагнитного поля на трещины в металле (эксперимент) // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Материалы VIII международной конференции, Цахкадзор, 01–05 октября 2023 г. Ереван: Гитутюн, 2023. С. 159–160.
36. *Кукуджанов К.В., Левитин А.Л., Химуля В.В., Ченцов А.В.* О заживлении мезотрещин в металле под воздействием импульсного высокоэнергетического электромагнитного поля // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике : сборник тезисов докладов : в 4 т., Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. С. 1217–1218.
37. *Zuev L.B., Tsellermaer V. Ya., Gromov V.E., Murav'ev V.V.* Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts // Tech. Phys. 1997. V. 42. № 9. P. 1094–1096.  
<https://doi.org/10.1134/1.1258774>
38. *Zuev L.B., Sosnin O. V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Murav'ev V. V.* Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1998. V. 39. № 4. P. 639–641.  
<https://doi.org/10.1007/BF02471262>
39. *Зуев Л.Б., Соснин О.В., Подборонников С.Ф., Громов В.Е., Горлова С.Н.* Залечивание усталостных повреждений сталей импульсами электрического тока // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. № 3. С. 24–25.
40. *Shengru Q., Yanli L., Yun L., Chengyu Zh.* Damage healing of aluminum alloys by D. C. Electropulsing and evaluation by resistance // Rare Met. Mater. Eng. 2009. V. 38. № 4. P. 570–573.  
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(10\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(10)60027-6)
41. *Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K.* Plastic deformation in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // Mech. Mater. 2012. V. 55. P. 146–162.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.07.001>
42. *Hosoi Atsushi, Kishi Tomoya, Ju Yang.* Healing of fatigue crack by high-density electropulsing in austenitic stainless steel treated with the surface-activated pre-coating // Materials. 2013. V. 6. № 9. P. 4213–4225.  
<https://doi.org/10.3390/ma6094213>

43. *Yu Tao, Deng Dewei, Wang Gang, Zhang Hongchao*. Crack healing in SUS304 stainless steel by electropulsing treatment // *J. Clean. Prod.* 2016. V. 113. P. 989–994.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.060>
44. *Song Hui, Wang Zhong-jin Jin, He Xiao-dong Dong, Duan Jie*. Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli // *Sci. Rep. Springer US.* 2017. V. 7. № 1. P. 7097.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-06635-9>
45. *Wu Z., Wu S., Bao J., Qian W., Karabal S., Sun W., Withers P.J.* The effect of defect population on the anisotropic fatigue resistance of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Int. J. Fatig.* 2021. V. 151. P. 106317.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106317>
46. *Sivukhin D.V.* Obschiy kurs fiziki. T. 3. Elektrichestvo [The general course of physics. V. 3. Electricity], M.: Fizmatlit, 2004, 656 p. ISBN: 5-9221-0227-3; 5-89115-086-5. [in Russian]
47. EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet [https://www.in3dtec.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminium\\_AlSi10Mg\\_-Data-sheet.pdf](https://www.in3dtec.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminium_AlSi10Mg_-Data-sheet.pdf) (15.08.2024).
48. *Silbermagel C., Ashcroft I., Galea M.* Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors // *Addit. Manuf.* V. 21. P. 395–403.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.027>
49. *Кукуджанов К.В., Коломиец А.В., Левитин А.Л.* Процессы деформирования и разрушения стохастически неоднородных упруговязкопластических материалов с дефектами при электродинамическом и термомеханическом нагружениях // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния.* 2014. № 4 (22). С. 11–21.
50. *Кукуджанов К.В., Левитин А.Л.* Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // *Вестник ПНИПУ. Механика.* 2015. № 1. С. 106–120.
51. *Салганик Р.Л.* Термоупругое равновесие тела с трещинами при разогреве, вызванном пропусканием тока перпендикулярно трещинам // *Изв. АН СССР. МТТ.* 1978. № 5. С. 141–152.
52. *Салганик Р.Л.* Разогрев материала с эллипсоидальной неоднородностью вследствие электрических потерь // *Изв. АН СССР. МТТ.* 1980. № 6. С. 98–109.
53. *Qin Rongshan, Su Shengxia.* Thermodynamics of crack healing under electropulsing // *J. Mater. Res.* 2002. V. 17. № 8. P. 2048–2052.  
<https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0303>
54. *Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В.* Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // *Изв. АН СССР. МТТ.* 2010. № 3. С. 188–199.
55. *Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В.* Модель термоэлектропластичности и изменения механических свойств металлов на основе реорганизации структуры дефектов под воздействием импульсного электрического тока // *Изв. АН СССР. МТТ.* 2011. № 6. С. 6–21.
56. *Коломиец А.В., Кукуджанов В.Н., Кукуджанов К.В., Левитин А.Л.* Моделирование неупругого разрушения неоднородных материалов при электродинамическом и термомеханическом воздействиях // *Препринт № 1054. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,* 2013. С. 35.

57. *Yu Jing, Zhang Hongchao, Deng Dewei, Hao Shengzhi.* Iqbal Asif. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing // Chinese J. Mech. Eng. 2014. V. 27. № 4. P. 745–753.  
<https://doi.org/10.3901/CJME.2014.0414.075>
58. *Кондратьев Н.С., Трусов П.В.* Многоуровневые модели пластичности многофазных поликристаллических материалов, основанные на физических теориях пластичности и вязкопластичности // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 1. С. 76–105.
59. *Кукуджанов К.В., Левитин А.Л.* О воздействии высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в упругопластическом проводящем материале // Проблемы прочности и пластичности. 2015. Т. 77. № 3. С. 217–226.
60. *Kukudzhyanov K.V., Levitin A.L.* Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part I // Nanosci. Technol. An Int. J. 2015. V. 6. № 3. P. 233–249.  
<https://doi.org/10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60>
61. *Кукуджанов К.В.* О залечивании поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 2. С. 99–124.
62. *Кукуджанов К.В., Левитин А.Л.* Численное моделирование изменения поврежденности металла под действием импульсов тока высокой плотности // Вестник НИЯУ МИФИ. 2018. Т. 7. № 6. С. 515–524.  
<https://doi.org/10.1134/S2304487X1806007X>
63. *Kukudzhyanov K.V., Levitin A.L.* Modelling of some mechanism of metal electroplasticity under pulsed high-energy electromagnetic field action // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1205. P. 012032.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1205/1/012032>
64. *Kukudzhyanov K.V., Levitin A.L., Ugurchiev U.Kh.* Healing of cracks in plates by strong electromagnetic field // J. Samara State Tech. Univ. Ser. Phys. Math. Sci. 2021. V. 25. № 1. P. 193–202.  
<https://doi.org/10.14498/vsgtu1831>
65. *Kukudzhyanov K.V.* Modeling of self-healing of microcracks in the process of longitudinal electroplastic rolling // J. Phys. Conf. Ser. 2022. V. 2231. № 1. P. 012022.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2231/1/012022>
66. *Guo H., Liu P., Qin X., Song Y., Qian D., Xie L. et al.* Electroshock treatment dependent microstructural evolution and mechanical properties of near- $\beta$  titanium alloy manufactured by directed energy deposition // Mater. Des. 2021. V. 212. P. 110286.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110286>
67. *Xie L., Guo H., Song Y., Liu C., Wang Z., Hua L. et al.* Effects of electroshock treatment on microstructure evolution and texture distribution of near- $\beta$  titanium alloy manufactured by directed energy deposition // Mater. Charact. 2020. V. 161. P. 110137.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110137>
68. *Xie L., Liu C., Song Y., Guo H., Wang Z., Hua L. et al.* Evaluation of microstructure variation of TC11 alloy after electroshocking treatment // J. Mater. Res. Technol. 2020. V. 9. № 2. P. 2455–2466.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.076>
69. *Cai Q., Rey Rodriguez P., Carracelas Santos S., Castro G., Mendis Ch.L., Chang I.T.H., Assadi H.* Crack healing via electropulsing treatment applied to additive-manufactured TiC/316L stainless steel composites // Mater. Lett. 2024. V. 365. P. 136410.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136410>

70. *Fan Shijing, He Bo, Liu Meishuai*. Effect of pulse current density on microstructure of Ti-6Al-4V alloy by laser powder bed fusion // *Metals*. 2022. V. 12. № 8.  
<https://doi.org/10.3390/met12081327>
71. *Yan X., Xu X., Wu Ch., Zhao Y., Li D., Zhou Y. et al.* A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Surf. Coatings Technol.* 2023. V. 458. P. 129364.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129364>

## A REVIEW OF STUDIES ON IMPROVING THE PLASTIC PROPERTIES OF ADDITIVE MATERIALS UNDER STRONG PULSED CURRENT

**K. K. Kukudzhanov<sup>a, \*</sup>**

<sup>a</sup>*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: [kkukudzhanov@yandex.ru](mailto:kkukudzhanov@yandex.ru)*

**Abstract** – An overview of research methods for improving the physico-mechanical properties of conductive materials grown using additive manufacturing techniques is presented. The review is conducted in order to develop a method for improving the properties of additive steel AISI 316L made by selective laser melting (SLM). This steel is widely used in various industries due to its versatile properties. The main methods of thermal and thermomechanical processing are briefly analyzed. Methods of improving plastic properties by impacting the material to pulses of a strong electromagnetic field, which causes high-density currents in the material considered as well. Based on the review, it is suggested that it is advisable to study the effect of a high-energy electromagnetic field on improving the plastic properties of materials built with selective laser melting.

*Keywords:* additive material, selective laser melting (SLM), healing, high density electric current, technological defects, microcracks, micropores

## REFERENCES

1. *Guo N., Leu M.C.* Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Front. Mech. Eng.* 2013. V. 8. № 3. P. 215–243.  
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
2. *Kanishev M.V., Ulyev M.U.* Introduction to additive technologies. Vol. 1. Review of the main 3D printing technologies: textbook. (In Russian) M.: Publishing House of NUST “MISIS”, 2023. 352 p. ISBN: ISBN978-5-907560-37-6
3. *Dryepondt S., Nandwana P., Fernandez-Zelaia P., List F.* Microstructure and high temperature tensile properties of 316L fabricated by laser powder-bed fusion // *Addit. Manuf.* Elsevier B.V., 2021. V. 37. P. 101723.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101723>

4. *Brennan M.C., Keist J.S., Palmer T.A.* Defects in Metal Additive Manufacturing Processes // *J. Mater. Eng. Perform.* 2021. V. 30. № 7. P. 4808–4818.  
<https://doi.org/10.1007/s11665-021-05919-6>
5. *Malekipour E., El-Mounayri H.* Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 95. № 1–4. P. 527–550.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1172-6>
6. *Zhang B., Li Y., Bai Q.* Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review // *Chinese J. Mech. Eng. Chinese Mechanical Engineering Society*, 2017. V. 30. № 3. P. 515–527.  
<https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>
7. *Khodabakhshi F., Farshidianfar M.H., Gerlich A.P., Nosko M., Trembošová V., Khajepour A.* Effects of laser additive manufacturing on microstructure and crystallographic texture of austenitic and martensitic stainless steels // *Addit. Manuf.* 2020. V. 31. P. 100915.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100915>
8. *Noell Ph.J., Rodelas J.M., Ghanbari Z.N., Laursen Ch.M.* Microstructural modification of additively manufactured metals by electropulsing // *Addit. Manuf.* 2020. V. 33.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101128>
9. *Xue L., Liao Ch., Wu M., Li Q., Hu Zh., Yang Y, Liu J.* Improvement of mechanical properties and corrosion resistance of SLM-AlSi10Mg alloy by an eco-friendly electric pulse treatment // *J. Clean. Prod. Elsevier Ltd*, 2024. V. 439. P. 140864.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140864>
10. *Qin L.Y., Men J.H., Zhang L.S., Zhao S., Li C.F., Yang G., Wang W.* Microstructure homogenizations of Ti-6Al-4V alloy manufactured by hybridselective laser melting and laser deposition manufacturing // *Materials Science & Engineering A*. 2019. V. 759. P. 404–414.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.049>
11. *Nguyen H.D., Pramanik A., Basak A.K., Dong Y., Prakash C., Debnath S. et al.* Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 18. P. 4641–4661.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
12. *Lai Wei-Jen, Ojha Avinesh, Li Ziang, Engler-Pinto Carlos, Su Xuming.* Effect of residual stress on fatigue strength of 316L stainless steel produced by laser powder bed fusion process // *Prog. Addit. Manuf.* 2021. V. 6. № 3. P. 375–383.  
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00164-8>
13. *Elangeswaran Ch., Cutolo A., Muralidharan G.K., de Formanoir Ch., Berto F., Vanmeensel K., van Hooreweder B.* Effect of post-treatments on the fatigue behaviour of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion // *Int. J. Fatigue*. 2019. V. 123. P. 31–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.013>
14. *Zhang M., Sun Ch.-N., Zhang X., Wei J., Hardacre D., Li H.* High cycle fatigue and ratcheting interaction of laser powder bed fusion stainless steel 316L: Fracture behaviour and stress-based modelling // *Int. J. Fatigue*. 2019. V. 121. P. 252–264.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.12.016>
15. *Gel'atko M., Hatala M., Botko F., Vandžura R., Hajnyš J., Šajgalík M., Török J.* Stress Relieving Heat Treatment of 316L Stainless Steel Made by Additive Manufacturing Process // *Materials (Basel)*. 2023. V. 16. № 19. P. 6461.  
<https://doi.org/10.3390/ma16196461>

16. *Chadha K., Tian Yu., Spray J., Aranas C.* Effect of Annealing Heat Treatment on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot Isostatic Pressed 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion // *Metals (Basel)*. 2020. V. 10. № 6. P. 753.  
<https://doi.org/10.3390/met10060753>
17. *Troitsky O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D.* Physical Foundations and Technologies for Processing Modern Materials (Theory, Technology, Structure, and Properties) [in Russian], in 2 V. V. 1, Institut Kompyuternykh Issledovaniy, Moscow-Izhevsk (2004).
18. *Kablov E.N., Orlov M.P., Ospennikova O.G.* Mechanisms of porosity in the single-crystal turbine blades and kinetics of its elimination during hot isostatic pressing // *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. № 5. P. 117–129.
19. *Liverani E., Lutey A.H.A., Ascari A., Fortunato A.* The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM) // *Int. J. Adv. Manuf. Technol. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 107. № 1–2. P. 109–122.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05072-9>
20. *Röttger A., Geenen K., Windmann M., Binner F., Theisen W.* Comparison of microstructure and mechanical properties of 316 L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material // *Mater. Sci. Eng. A. Elsevier*, 2016. V. 678. P. 365–376.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.012>
21. *Grech I.S., Sullivan J.H., Lancaster R.J., Plummer J., Lavery N.P.* The optimisation of hot isostatic pressing treatments for enhanced mechanical and corrosion performance of stainless steel 316L produced by laser powder bed fusion // *Addit. Manuf. Elsevier B.V.*, 2022. V. 58. P. 103072.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103072>
22. *Leuders S., Lienke T., Lammers S., Tröster T., Niendorf T.* On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting – The role of ductility // *J. Mater. Res.* 2014. V. 29. № 17. P. 1911–1919.  
<https://doi.org/10.1557/jmr.2014.157>
23. *Chao Q., Thomas S., Birbilis N., Cizek P., Hodgson P.D., Fabijanic D.* The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel // *Mater. Sci. Eng. A. Elsevier B.V.*, 2021. V. 821. P. 141611.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141611>
24. *Troitskii O.A., Likhhtman V.I.* The effect of the anisotropy of electron and g radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state // *J. Kokl. Akad. Nauk. SSSR*. 1963. № 148. P. 332–334.
25. *Beklemishev N.N., Koryagin N.I., Shapiro G.S.* Influence of Locally Inhomogeneous Pulse Electric Field on Plasticity and Strength of Conducting Materials // *Izv. Akad. Nauk SSSR. Met.* 1984. № 4. P. 184–187 [Russ. Metallurgy (Metally) (Engl. Transl.)].
26. *Beklemishev N.N., Koryagin N.I., Shapiro G.S.* The process of plastic deformation in a pulsed electromagnetic field of some conductive materials // *Izv. Akad. Nauk SSSR. Met.* 1985. № 1. P. 159–167.

27. *Beklemishev N.N., Kukudzhanov V.N., Porokhov V.A. et al.* Plasticity and Strength of Metallic Materials with the Pulse Action of a High-Energy Electromagnetic Field Taken into Account, Preprint № 372 (IPM AN SSSR, Moscow, 1989) [in Russian].
28. *Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V.* Plane Problem of Effect of an Instantaneous Point Heat Source // *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela.* 1988. № 4. P. 118–122 [Mech. Solids (Engl. Transl.) V. 23. № 4. P. 113–117].
29. *Conrad H.* A study into the mechanism(s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue. Final Report ARO Proposal Number 23090-MS, ARO Funding Document DAAL03-86-K-0015, U. S. Army Research Office, North Carolina. 1989. 52 p.
30. *Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Gromov V.E.* Increasing the multicycle fatigue of titanium alloy under current action // *Hardening technologies and coatings.* 2019. V. 15. № 5 (173). P. 213–218.
31. *Kukudzhanov K.V., Chentsov A.V.* Investigation of the effect of pulse electromagnetic field on the healing damage of zinc // *Perm National Research Polytechnic University Aerospace Bulletin.* 2020. № 61. P. 40–49.  
<https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.61.05>
32. *Kukudzhanov K.V., Chentsov A.V.* On the healing of porosity in metal under the action of a high-energy electromagnetic field // *Bulletin of the I.Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. The Mechanics of the Limit State series.* 2020. V. 2. № 44. P. 116–131.  
<https://doi.org/10.37972/chgpu.2020.44.2.012>
33. *Ren X., Wang Zh., Fang X., Song H, Duan J.* The plastic flow model in the healing process of internal microcracks in pre-deformed TC4 sheet by pulse current // *Mater. Des.* 2020. V. 188. P. 108428.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108428>
34. *Xu Wenchen, Yang Chuan, Yu Haiping, Jin Xueze, Yang Guojing, Shan Debin, Guo Bin.* Combination of eddy current and heat treatment for crack healing and mechanical-property improvement in magnesium alloy tube // *J. Magnes. Alloy.* 2021. V. 9. № 5. P. 1768–1781. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.08.022>
35. *Kukudzhanov K.V.* The effect of a short-pulse high-energy electromagnetic field on cracks in metal (experiment) // *Actual problems of continuum mechanics: Proceedings of the VIII International Conference, Tsakhkadzor, October 01–05, 2023.* Yerevan: Gitutyun, 2023. P. 159–160.
36. *Kukudzhanov K.V., Levitin A.L., Khimulya V.V., Chentsov A.V.* On the healing of mesocracks in metal under the influence of a pulsed high-energy electromagnetic field // *XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics: collection of abstracts: in 4 volumes, St. Petersburg, August 21–25, 2023.* Saint Petersburg: Polytech Press, 2023. P. 1217–1218.
37. *Zuev L.B., Tsellermaer V. Ya., Gromov V.E., Murav'ev V.V.* Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts // *Tech. Phys.* 1997. V. 42. № 9. P. 1094–1096.  
<https://doi.org/10.1134/1.1258774>
38. *Zuev L.B., Sosnin O. V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Murav'ev V.V.* Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1998. V. 39. № 4. P. 639–641.  
<https://doi.org/10.1007/BF02471262>

39. *Zuev L.B., Sosnin O.V., Podboronnikov S.F., Gromov V.E., Gorlova S.N.* Healing fatigue damage in steel with electric current pulses // *Technical Physics*. 2000. V. 45. № 3. P. 309–311.
40. *Shengru Q., Yanli L., Yun L., Chengyu Zh.* Damage Healing of Aluminum Alloys by D.C. Electropulsing and Evaluation by Resistance // *Rare Met. Mater. Eng.* 2009. V. 38. № 4. P. 570–573.  
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(10\)60027-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(10)60027-6)
41. *Gallo F., Satapathy S., Ravi-Chandar K.* Plastic deformation in electrical conductors subjected to short-duration current pulses // *Mech. Mater.* 2012. V. 55. P. 146–162.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.07.001>
42. *Hosoi Atsushi, Kishi Tomoya, Ju Yang.* Healing of Fatigue Crack by High-Density Electropulsing in Austenitic Stainless Steel Treated with the Surface-Activated Pre-Coating // *Materials (Basel)*. 2013. V. 6. № 9. P. 4213–4225.  
<https://doi.org/10.3390/ma6094213>
43. *Yu T., Deng D., Wang G., Zhang H.* Crack healing in SUS304 stainless steel by electropulsing treatment // *J. Clean. Prod.* 2016. V. 113. P. 989–994.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.060>
44. *Song Hui, Wang Zhong-jin Jin, He Xiao-dong Dong, Duan Jie.* Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli // *Sci. Rep. Springer US*. 2017. V. 7. № 1. P. 7097.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-06635-9>
45. *Wu Z., Wu S., Bao J., Qian W., Karabal, S., Sun W. et al.* The effect of defect population on the anisotropic fatigue resistance of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion // *Int. J. Fatig.* 2021. V. 151. P. 106317.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106317>
46. *Sivukhin D.V.* *Obschiy kurs fiziki. T. 3. Elektrichestvo [The general course of physics. V. 3. Electricity]*, Moscow: Fizmatlit, 2004, 656 p. ISBN: 5-9221-0227-3; 5-89115-086-5. [in Russian]
47. EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet [https://www.in3dtec.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminium\\_AlSi10Mg\\_-Data-sheet.pdf](https://www.in3dtec.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminium_AlSi10Mg_-Data-sheet.pdf) (15.08.2024).
48. *Silbernagel C., Ashcroft I., Galea M.* Electrical resistivity of additively manufactured AlSi10Mg for use in electric motors, *Additive Manufacturing* № 21, May 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.027>
49. *Kukudzhanov K.V., Kolomiets A.V., Levitin A.L.* Processes of deformation and destruction of stochastically inhomogeneous elastic-viscous plastic materials with defects under electrodynamic and thermomechanical loads // *Bulletin of the I.Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. The Mechanics of the Limit State series*. 2014. V. 4. № 22. P. 11–21.
50. *Kukudzhanov K.V., Levitin A.L.* Modeling the treatment of high-energy pulsed electromagnetic field of the micro-cracks in a polycrystalline metal // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2015. № 1. P. 106–120.  
<https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.4.09>
51. *Salganik R.L.* Thermoelastic Equilibrium of a Solid with Cracks under Heating Caused by Passage of a Current Perpendicular to the Cracks, *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*. 1978. № 5. P. 141–152 [Mech. Solids (Engl. Transl.). 1978. V. 13. № 5. P. 129–138].

52. *Salganik R.L.* Heating of a Material with an Ellipsoidal Nonuniformity as a Result of Electrical Losses // *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela.* 1980. V. 15. № 6. P. 98–109 [Mech. Solids (Engl. Transl.). 1980. V. 15. № 6. P. 87–98].
53. *Qin R., Su Sh.* Thermodynamics of crack healing under electropulsing // *J. Mater. Res.* 2002. V. 17. № 8. P. 2048–2052.  
<https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0303>
54. *Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V.* Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects. *Mechanics of Solids.* 2010. № 3. P. 188–199.  
<https://doi.org/10.3103/S0025654410030167>
55. *Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V.* A model of thermoelectroplasticity of variations in the mechanical properties of metals based on defect structure reorganization under the action of pulse electric current. *Mechanics of Solids.* 2011. V. 46. № 6. P. 814–827.  
<https://doi.org/10.3103/S0025654411060021>
56. *Kolomiets A.V., Kukudzhанov V.N., Kukudzhанov K.V., Levitin A.L.* Modeling inelastic fracture of inhomogeneous materials under electrodynamic and thermomechanical influences // Preprint № 1054. Ishlinsky Institute of Problems of Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 2013. P. 35.
57. *Yu J., Zhang H., Deng D., Hao Sh.* Iqbal Asif. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing // *Chinese J. Mech. Eng.* 2014. V. 27. № 4. P. 745–753.  
<https://doi.org/10.3901/CJME.2014.0414.075>
58. *Kondratev N.S., Trusov P.V.* Multilevel models of crystal plasticity and viscoplasticity in multiphase polycrystalline materials // *PNRPU Mechanics Bulletin.* 2015. № 1. P. 76–105. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.06>
59. *Kukudzhанov K.V., Levitin A.L.* About the treatment of high energy pulsed electromagnetic field on the micro-cracks in elastoplastic conductive material // *Problems of strength and plasticity.* 2015. V. 77. № 3. P. 217–226.  
<https://doi.org/10.32326/1814-9146-2015-77-3-217-226>
60. *Kukudzhанov K.V., Levitin A.L.* Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part I // *Nanomechanics Sci. Technol. An Int. J.* 2015. V. 6. № 3. P. 233–249.  
<https://doi.org/10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60>
61. *Kukudzhанov K.V.* On healing metal damages using high-energy pulsed electromagnetic field // *PNRPU Mechanics Bulletin.* 2017. № 2. P. 99–124.  
<https://doi.org/10.15593/perm.mec/2017.2.06>
62. *Kukudzhанov K.V., Levitin A.L.* Numerical simulation of damage evolution of a metal at treatment by high-density electric current -ulses// *Vestnik “MIFI”.* 2018. V. 7. № 6. P. 515–524.  
<https://doi.org/10.1134/S2304487X1806007X>
63. *Kukudzhанov K.V., Levitin A.L.* Modelling of some mechanism of metal electroplasticity under pulsed high-energy electromagnetic field action // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1205. P. 012032.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1205/1/012032>
64. *Kukudzhанov K.V., Levitin A.L., Ugurchiev U.Kh.* Healing of cracks in plates by strong electromagnetic field // *J. Samara State Tech. Univ. Ser. Phys. Math. Sci.* 2021. V. 25. № 1. P. 193–202.  
<https://doi.org/10.14498/vsgtu1831>

65. *Kukudzhanov K.V.* Modeling of self-healing of microcracks in the process of longitudinal electroplastic rolling // *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. V. 2231. № 1. P. 012022.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2231/1/012022>
66. *Guo H., Liu P., Qin X., Song Y., Qian D., Xie L. et al.* Electroshock treatment dependent microstructural evolution and mechanical properties of near- $\beta$  titanium alloy manufactured by directed energy deposition // *Mater. Des.* Elsevier Ltd, 2021. V. 212. P. 110286.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110286>
67. *Xie L., Guo H., Song Y., Liu C., Wang Z., Hua L. et al.* Effects of electroshock treatment on microstructure evolution and texture distribution of near- $\beta$  titanium alloy manufactured by directed energy deposition // *Mater. Charact.* 2020. V. 161. P. 110137.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163969>
68. *Xie L., Liu C., Song Y., Guo H., Wang Z., Hua L. et al.* Evaluation of microstructure variation of TC11 alloy after electroshocking treatment // *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9. № 2. P. 2455–2466.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.076>
69. *Cai Q., Rey Rodriguez P., Carracelas Santos S., Castro G., Mendis Ch.L., Chang I.T.H., Assadi H.* Crack healing via electropulsing treatment applied to additive-manufactured TiC/316L stainless steel composites // *Mater. Lett.* Elsevier B. 2024. V. 365. P. 136410.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136410>
70. *Fan Sh., He B., Liu M.* Effect of Pulse Current Density on Microstructure of Ti-6Al-4V Alloy by Laser Powder Bed Fusion // *Metals (Basel)*. 2022. V. 12. № 8.  
<https://doi.org/10.3390/met12081327>
71. *Yan X., Xu X., Wu Ch., Zhao Y., Li D., Zhou Y. et al.* A novel electropulsing treatment to improve the surface strength and repair the pore of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Surf. Coatings Technol.* 2023. V. 458. № 5988. P. 129364.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129364>