

УДК 622.692.4.053

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДОВ

Щипачев Андрей Михайлович¹,
schipachev_am@pers.spmi.ru

Алжадли Мохаммед¹,
mohammedaljadly@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность. В процессе эксплуатации нефте- и газопроводов в структуре металла их стенок возникают дефекты сплошности (поры, расслоения, трещины различной природы и др.). Особенность данных дефектов обусловлена тем, что при эксплуатационных нагрузках в их вершинах возникает концентрация напряжений, что приводит к росту количества дефектов и геометрических размеров с последующим слиянием последних и образованием крупных дефектов и, как следствие, снижению прочностных свойств металла трубопроводов. Раннее выявление дефектов сплошности металла и их устранение до того, как они достигнут критического размера, являются актуальными задачами, решение которых повысит надёжность и прочностные свойства металла трубопроводов, а также продлит их ресурс.

Цель: исследование эффективности магнитно-импульсной обработки для повышения прочностных характеристик металла стенки бывших в эксплуатации нефте- и газопроводов путем уменьшения размеров дефектов.

Объекты: дефектные участки магистральных нефте- и газопроводов.

Методы: магнитно-импульсная обработка образцов из стали 17Г1С бывшего в эксплуатации магистрального газопровода диаметром 720 мм, содержащих коррозионное растрескивание под напряжением, на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ, определение изменений температуры, вызванных магнитно-импульсной обработкой, испытание образцов на ударную вязкость, определение влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства металла газопровода, исследование поверхности излома образцов после испытаний на ударную вязкость.

Результаты. Экспериментально было установлено повышение на 14 % ударной вязкости обработанных магнитно-импульсной обработкой образцов по сравнению с необработанными образцами. Снимки распределения температуры при магнитно-импульсной обработке показали значительное повышение температуры вблизи вершин трещин. Было выявлено, что разрушение металла образцов, подвергнутых магнитно-импульсному воздействию, приобрело более вязкий характер.

Ключевые слова:

дефекты сплошности, магистральный газопровод, магнитно-импульсное поле, индуктор, термические сжимающие напряжения, ударная вязкость.

Введение

В технологических процессах изготовления и в процессе эксплуатации магистральных нефте- и газопроводов в их металле возникают дефекты сплошности (поры, расслоения, трещины различной природы и др.). Зарождение, рост и накопление этих дефектов в структуре металла приводят к снижению способности металла сопротивляться деформации вследствие снижения пластичности [1–3]. При воздействии эксплуатационных нагрузок на стенку трубопровода в вершинах имеющихся в ней дефектов возникают зоны концентрации напряжений, что приводит к увеличению количества дефектов и их геометрических размеров с последующим слиянием дефектов и образованием крупных несплошностей, и, как следствие, снижаются эксплуатационные, прочностные свойства и срок службы трубопроводов, находящихся в эксплуатации [4–6].

Известно, что нефте- и газопроводы постоянно находятся в сложном напряженном состоянии, подвергаясь воздействию множественных переменных и статических нагрузок (колебания давления, гидроудары, вибрационные процессы, температурные воздействия и др.), что обеспечивает благоприятные

условия для накопления повреждений и их быстрого роста вплоть до разрушения [7–9]. Проведенный анализ причин аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о том, что возникновение, накопление и распространение дефектов сплошности в металле трубопроводов являются основными причинами преждевременного выхода их из строя [10–14].

Таким образом, раннее выявление дефектов сплошности металла и их устранение на ранней стадии их развития до того, как они достигнут критического размера, являются актуальными задачами, решение которых значительно повысит надёжность трубопроводов и продлит их ресурс.

С целью сокращения времени и стоимости ремонтных работ был разработан ряд методов, которые позволяют восстановить дефектные зоны металла: электронно-лучевая обработка, термическая обработка, обработка лазерными ударными импульсами, обработка высокоэнергетическим импульсным током [15–18]. Однако эти методы являются эффективными только для устранения поверхностных и подповерхностных дефектов из-за малой глубины проникновения. Кроме того, их можно применять только в лабораторных и стендовых условиях [19–21].

Одним из современных методов устранения дефектов сплошности в металлических конструкциях, находящихся под нагрузкой, является магнитно-импульсная обработка (МИО). Было установлено, что при воздействии на металл высокоэнергетическим электромагнитным импульсом вблизи несплошностей происходит концентрация электромагнитного поля [22, 23]. В результате этого, наряду с механическим воздействием, происходит частичное расплавление металла в зоне максимальной концентрации – в вершине трещиноподобного дефекта [24].

В работах ряда ведущих специалистов в области магнитно-импульсной обработки металлов [25, 26] были предложены математические модели для изучения физических механизмов восстановления сплошности структуры металла высокоэнергетическим электромагнитным импульсом. Из предложенных моделей следует, что при воздействии на металл высокоэнергетическим электромагнитным импульсом вблизи трещин происходит быстрый неоднородный локальный нагрев, сопровождаемый тепловым расширением, и, как следствие, возникают большие сжимающие напряжения, приводящие к смыканию берегов трещин и замедлению их дальнейшего развития. Экспериментальное подтверждение устранения дефектов структуры металла высокоэнергетическим электромагнитным воздействием было получено в работе [27]. Исследование показало, что микродефекты титановых пластин «залечиваются» после электромагнитного воздействия. Смыкание дефектов происходит при определенных характеристиках (величине, продолжительности и т. п.) импульсного воздействия.

В статьях, посвященных восстановлению работоспособности металлов [28, 29], проведены экспериментальные исследования изменения объема микродефектов и восстановления сплошности образцов, изготовленных из различных сталей, после воздействия на них высокоэнергетическим электромагнитным импульсом. В результате было установлено, что вследствие электромагнитного воздействия происходит восстановление сплошности структуры металла.

На основе анализа работ отечественных и зарубежных авторов по вопросу устранения дефектов сплошности магнитно-импульсной обработкой следует отметить, что экспериментальные исследования проводились только на тонких металлических пластинах (1–5 мм), изготовленных из сплавов с низколегированной трубной стали, титанового сплава ВТ1-00 и алюминиевого сплава АД000 [30–32].

Использование образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации магистральных газопроводов, позволит учитывать состав металла трубопроводов и толщину их стенок как фактор, влияющий на эффективность магнитно-импульсной обработки.

В данной работе был проведен анализ результатов магнитно-импульсной обработки образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации газопроводов, содержащих поверхностные трещины. Обработка образцов производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора.

Принцип работы магнитно-импульсной установки

Принцип работы магнитно-импульсной установки (МИУ) основан на прямом преобразовании электрической энергии, запасаемой накопителем энергии, в электромагнитное поле, действующее в рабочей зоне индуктора при разряде импульсных конденсаторов накопителей энергии. Электромагнитное поле индуктора наводит в обрабатываемой детали вихревые токи. Вихревые токи, в свою очередь, создают электромагнитное поле, взаимодействие которого с электромагнитным полем индуктора приводит к деформации обрабатываемой детали. С другой стороны, вихревые токи приводят к импульсному нагреву детали в окрестностях дефектов сплошности [33, 34]. Импульс магнитного поля (ИМП) воздействует на обрабатываемую заготовку как в виде затухающего синусоидального импульсного давления, так и в виде термических напряжений, действующих в скин-слое [35, 36]. Давление на поверхность металла распространяется в виде волны сжатия, вызывая пластическую деформацию несплошностей и уменьшение их размеров [37, 38]. Термические напряжения возникают в результате концентрации индукционных токов вблизи вершин микротрещин, что приводит к локальному неоднородному нагреву этих зон. Нагрев в окрестности трещин сопровождается тепловым расширением, и, как следствие, в контуре дефекта возникают термические сжимающие напряжения, приводящие к смыканию трещин.

Температура вблизи вершин трещин может, в зависимости от параметров МИО и свойств обрабатываемой детали, увеличиться вплоть до расплавления металла. При этом образуется кратер, диаметр которого может достигать нескольких миллиметров.

Расплавленный металл выбрасывается внутрь трещин под действием сжимающих напряжений. В результате происходит заваривание трещин расплавленным материалом и торможение их дальнейшего развития [39, 40].

Материалы и методы исследования

Приготовление образцов

В качестве материала для исследования были изготовлены два фрагмента из стали 17Г1С из бывших в эксплуатации магистральных трубопроводов диаметром 720 мм, содержащих поверхностные трещины. Размеры фрагментов составили 301×50 мм, а средняя толщина – 16,6 мм.

Специфическое распределение трещин на поверхности фрагментов было исследовано магнитопорошковым и магнитно-вихретоковым контролем.

В качестве средств для магнитопорошкового контроля была использована черная магнитопорошковая суспензия Magnavis 7HF. Магнитно-вихретоковый контроль проводился с помощью вихретокового дефектоскопа ВК-1.

По результатам магнитопорошкового контроля на наружной поверхности фрагментов была обнаружена сетка продольных трещин, по внешним признакам соответствующая коррозионному растрескиванию под

напряжением (КРН). Глубина трещин была определена магнитно-вихретоковым контролем и составляла от 0,3 до 1,5 мм, ширина раскрытия – менее 0,1 мм.

На рис. 1 приведено изображение наружной поверхности фрагмента № 1 после проведения магнито-

порошкового контроля, где отображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472×3648 пикселей).

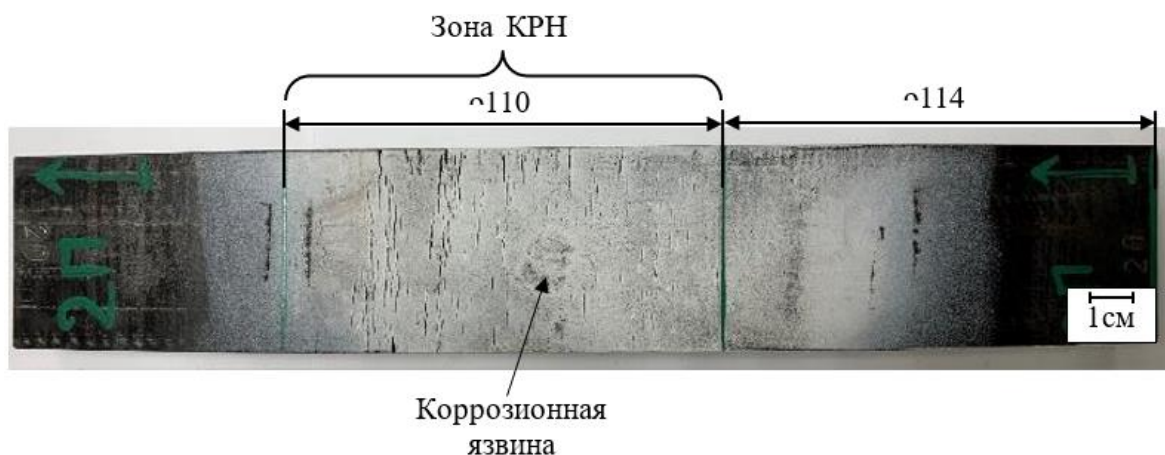


Рис. 1. Изображение наружной поверхности фрагмента № 1 (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля

Fig. 1. Image of the outer surface of fragment no. 1 obtained by a Canon eos r6 body camera after magnetic particle inspection

На рис. 2 представлено изображение наружной поверхности фрагмента № 2 после проведения магнитопорошкового контроля, где отображена зона скопления дефектов коррозионного растрескивания под

напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472×3648 пикселей).

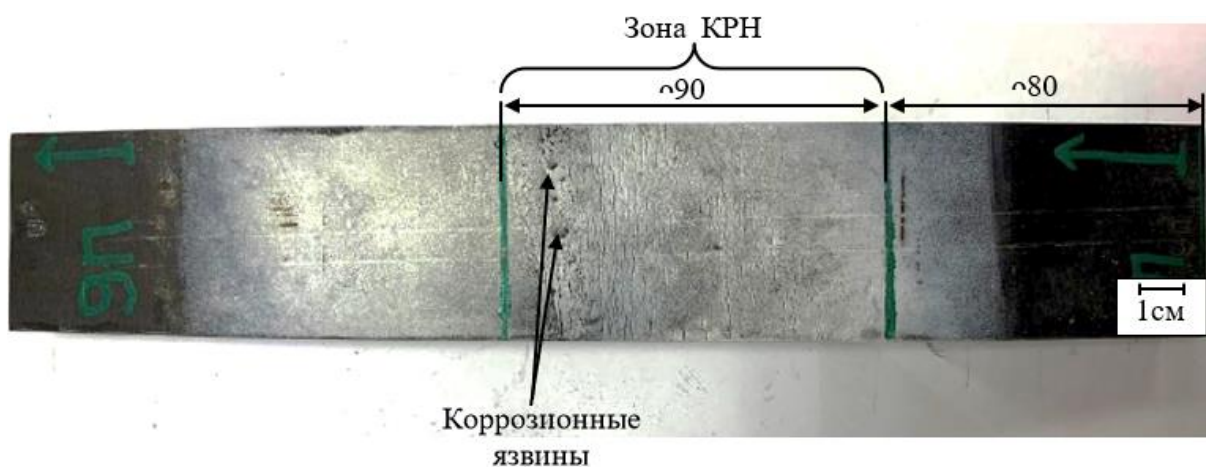


Рис. 2. Изображение наружной поверхности фрагмента № 2 (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля

Fig. 2. Image of the outer surface of fragment no. 2 obtained by a Canon eos r6 body camera, after magnetic particle inspection

Из зоны КРН образца № 1 были вырезаны ленточной пилой шесть образцов вдоль трещин размерами 50×10 мм.

На рис. 3 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 1, где отмечаются отдельные трещины, которым присвоили номера 1–7. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 0,8 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм. Трещины распространяются с наружной поверхности образца в глубину металла.

Из зоны КРН фрагмента № 2 были вырезаны ленточной пилой шесть образцов вдоль трещин размерами 50×10 мм.

На рис. 4 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 2, где выявлены отдельные трещины, распространяющиеся с наружной поверхности в глубину металла. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 1,1 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм.

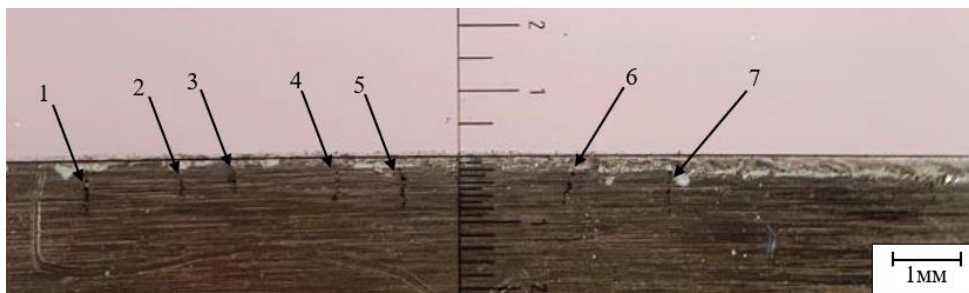


Рис. 3. Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента № 1, полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении

Fig. 3. Image of lateral surfaces of the sample prepared from the stress corrosion cracking zone of fragment no. 1, obtained by a loupe with 10× magnification



Рис. 4. Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента № 2, полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении

Fig. 4. Image of lateral surface of the sample prepared from the zone of stress corrosion cracking of fragments no. 2, obtained by a loupe with 10× magnification

Характеристики методов исследования

Шесть образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 1, составили группу образцов № 1, образцы из фрагмента № 2 – группу № 2.

Все образцы группы № 1 были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию со следующими параметрами: запасенная энергия 5 кДж; разрядный ток 175 кА.

Магнитно-импульсная обработка образцов группы № 1 производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора.

Магнитно-импульсная установка МИУ-10-СГАУ обладает следующими техническими характеристиками: максимальная запасаемая энергия в конденсаторах накопителей 10 кДж; напряжение заряда накопителей от 1 до 20 кВ; частота разрядного тока 55 кГц; масса 350 кг; габаритные размеры 0,8×0,9×1,1 м.

Магнитно-импульсная обработка осуществлялась следующим образом: образцы группы № 1 поочередно размещались внутри цилиндрического индуктора и фиксировались с помощью фиксатора во избежание их выброса образующимся давлением. Затем с помощью блока дозирования энергии устанавливалось нужное значение энергии (в нашем случае 5 кДж) и установка заряжалась до заданного ранее значения командой заряда. При достижении заданного уровня энергии запасенная энергия мгновенно разряжалась в

контуре индуктора с помощью команды разряда, которая запускала работу вакуумных разрядников. Индуктор преобразовывал электрическую энергию, протекающую в нем, в электромагнитное поле, действующее на обрабатываемые образцы.

С целью исследования температурного эффекта магнитно-импульсного воздействия были сделаны снимки распределения тепловых полей в процессе МИО. Снимки были сделаны с помощью тепловизора FLIR-P640 со следующими характеристиками: диапазон температур от –40 до +500 °С; быстродействие 1 мкс; погрешность 0,5 %.

После проведения МИО образцов группы № 1, образцы группы № 1 (подвергнутые магнитно-импульсному воздействию) и образцы группы № 2 (не подвергнутые магнитно-импульсному воздействию) были испытаны на ударную вязкость.

Данный метод был выбран, поскольку он является самым чувствительным к изменению структуры металла и его склонности к разрушению.

Исследования ударной вязкости проводились на маятниковом копре ИО 5003-03 одиночным ударом при комнатной температуре 25 °С, скорость движения маятника в момент удара составляла 5,32 м/с.

После испытаний образцов на ударную вязкость было исследовано поперечное сечение образцов, по которому произошло разрушение, с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) при 250-кратном увеличении.

Для исследования были выбраны два образца, один из группы № 1 (обработанный МИО), а другой из группы № 2 (необработанный МИО), образцы одновременно помещались в камеру микроскопа.

Микроскоп типа РЭМ-NANO SEM3000 имеет следующие технические характеристики: разрешение 1 нм; ускоряющее напряжение от 0 до 30 кВ; диапазон увеличения от 10× до 1 000 000×; максимальный размер образца 260×240 мм.

Результаты и обсуждения

Расчет ударной вязкости по итогам всех видов замеров был выполнен по формуле [41]:

$$a_k = \frac{A_k}{F},$$

где A_k – работа, затраченная на разрушение образца, Дж; F – площадь поперечного сечения образца, по которому произошло разрушение см^2 .

По полученным результатам испытаний на ударную вязкость составлены табл. 1, 2.

Результаты испытаний показывают, что ударная вязкость обработанных образцов магнитно-импульсным воздействием повысилась на 14 % по сравнению с необработанными образцами, что позволит сделать вывод о том, что образцы после магнитно-импульсной обработки стали более устойчивыми к разрушению.

С помощью тепловизора TVP FLIR-P640 были получены распределения тепловых полей, которые показали, что точкой интенсивного теплового воздействия являются вершины трещин, где зарегистрировано повышение температуры до 210 °С на момент окончания воздействия 710 мкс. Это соответствует результатам математического моделирования, проведенного в работах [25, 26].

Таблица 1. Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов, вырезанных из фрагмента № 2 (без магнитно-импульсной обработки)

Table 1. Results of calculating the impact strength for samples prepared from fragment no. 2 (without magnetic pulse treatment)

№ образца Sample no.	A_k , Дж/л	F , см^2 см^2	a_k , Дж/см ² J/cm ²	Среднее значение, Дж/см ² Average value, J/cm ²
1	48,2	0,82	58,8	61
2	49	0,822	59,6	
3	50,0 6	0,823	60,82	
4	51	0,824	62	
5	51,3	0,825	62,2	
6	51,7	0,827	62,5	

Таблица 2. Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов, вырезанных из фрагмента № 1 (после магнитно-импульсной обработки)

Table 2. Results of calculating the impact strength for samples prepared from fragment no. 1 (after magnetic pulse treatment)

№ образца Sample no.	A_k , Дж/л	F , см^2 см^2	a_k , Дж/см ² J/cm ²	Среднее значение, Дж/см ² Average value, J/cm ²
1	55,5	0,819	67,7	68,4
2	56,2	0,82	68,5	
3	56,5	0,823	68,65	
4	55,8	0,822	68	
5	56,7	0,825	68,7	
6	57,2	0,828	69	

На рис. 5 представлены снимки распределения температуры при МИО в разные моменты времени t .

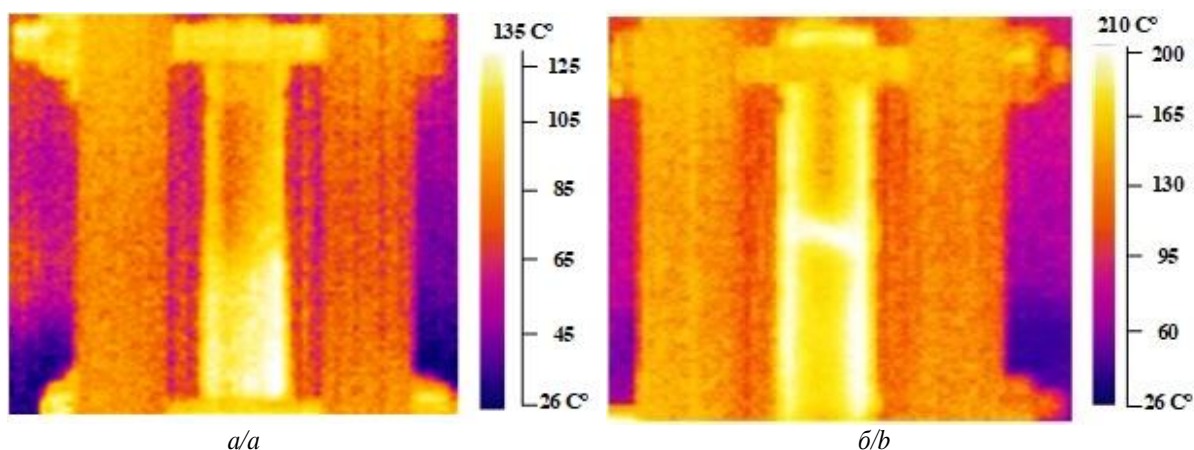


Рис. 5. Снимок распределения температуры при магнитно-импульсной обработке в разные моменты времени: а) $t=615$ мкс; б) момент окончания магнитно-импульсного воздействия ($t=710$ мкс)

Fig. 5. Snapshot of the temperature distribution during magnetic pulse processing at different points in time: а) $t=615$ μs ; б) moment of the end of the magnetic-pulsed action ($t=710$ μs)

На рис. 6 показан график распределения тепловых полей во время МИО, полученный с помощью тепловизора TVP FLIR-P640.

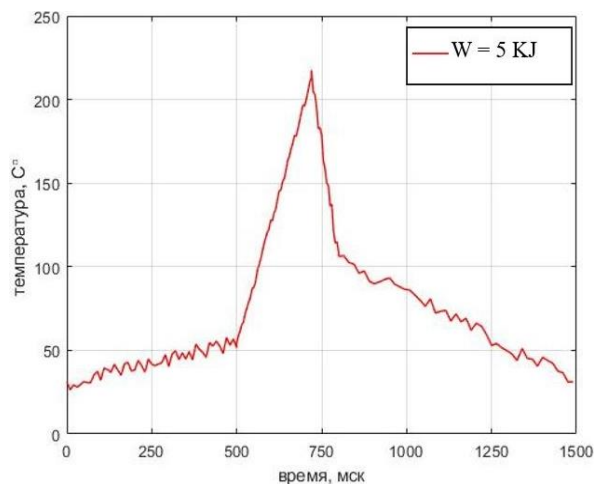


Рис. 6. Зависимость температуры от времени магнитно-импульсного воздействия при параметрах: запасенная энергия 5 кДж; разрядный ток 175 кА

Fig. 6. Dependence of temperature on the time of magnetic-pulse exposure with parameters: energy 5 kJ, discharge current 175 kA

Из рис. 6 следует, что температура вблизи вершин трещин не достигла значения плавления металла, что объясняется тем, что плотность индуцированных токов не достигла необходимого значения для плавления металла.

Полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) снимки поверхности излома образцов изображены на рис. 7, 8.

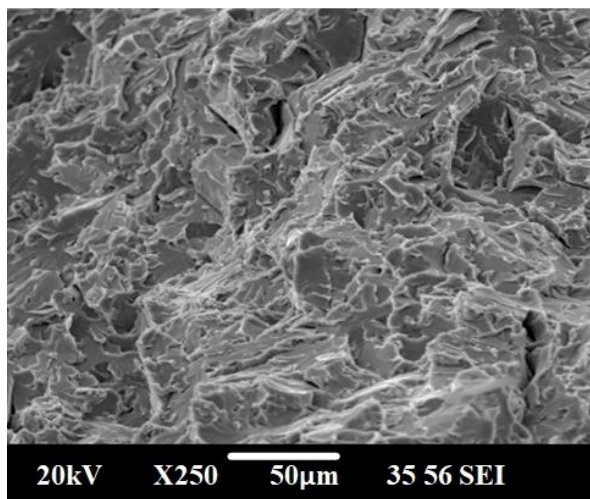


Рис. 7. Изображение поверхности излома образца без магнитно-импульсной обработки

Fig. 7. Image of the fracture surface of the sample without magnetic-pulse treatment

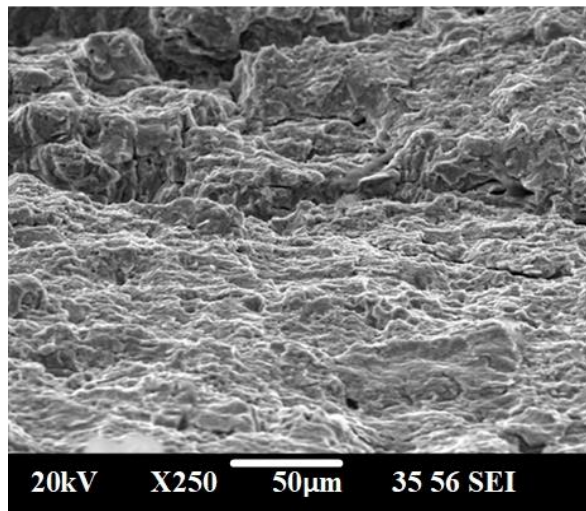


Рис. 8. Изображение поверхности излома образца с магнитно-импульсной обработкой

Fig. 8. Images of the fracture surface of the sample with magnetic-pulse treatment

На рис. 7 наблюдаются заостренные кромки границ излома, что соответствует признакам хрупкого разрушения. Снимок излома обработанного образца (рис. 8) показывает более сглаженные поверхности излома по сравнению с изломом необработанного образца, о чем свидетельствуют признаки вязкого разрушения (элементы чашечного рельефа).

Таким образом, полученные снимки излома образцов до и после магнитно-импульсной обработки дают возможность говорить о том, что воздействие на металл образцов высокоэнергетическим электромагнитным импульсом привело к структурным изменениям, так как разрушение металла после обработки стало более вязким.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что МИО приводит к повышению прочностных свойств металла трубопровода, содержащего систему трещиноподобных дефектов. В частности, ударная вязкость возросла на 14 %.
2. Полученные снимки температурных изменений при магнитно-импульсной обработке показывают, что применяемая энергия МИУ не была достаточна для того, чтобы достичь температуры расплавления металла. Таким образом, повышение ударной вязкости произошло не за счет устранения дефектов, а за счет структурных изменений металла, так как было установлено, что характер разрушения после обработки стал более вязким.
3. Полученные результаты исследований позволяют говорить о том, что применение данной технологии является перспективным для повышения надежности, срока службы деталей и улучшения их прочностных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksin A.I. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool

systems in the processing of welded structures from dissimilar steels // Materials science forum. – 2021. – V. 1022. – P. 7–16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7

2. Nanotechnologies of strength control of materials / V.V. Nosov, E. Grigoriev, S. Peretyatko, A.P. Artyushchenko // *MaterialsScienceForum*. – 2021. – V. 1040. – P. 101–108. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101
3. Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12. – № 20. – P. 10636. URL: <https://doi.org/10.3390/app122010636> (дата обращения: 15.12.2022).
4. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow / O.G. Perveitalov, V.V. Nosov, A.I. Borovkov, K.M. Khanukhov, N.V. Chetvertukhin // *Metals*. – 2023. – V. 13 (1). – № 4. DOI: 10.3390/met13010004
5. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data // *Applied Sciences*. – 2023. – V. 13. – № 1. – P. 48. DOI: 10.3390/app13010048
6. Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modeling of a stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection // *Journal of Mining Institute*. – 2018. – V. 234. – P. 643–646. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.643
7. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода / Р.Н. Бахтизин, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков, Р.Б. Масалимов // *Записки Горного института* – 2020. – Т. 242 – С. 160–168. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160
8. Fetisov V., Tevetkov P., Müller J. Tariff approach to regulation of the European gas transportation system: case of Nord Stream // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – № 6. – P. 413–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.023> (дата обращения: 15.12.2022).
9. Разработка технологии и устройства для ремонта магистральных трубопроводов с вырезанием их дефектных участков / Э.Р. Джемилев, И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, Б.Н. Мастобаев, А.К. Гумеров. // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 10. – С. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82
10. Kovshov S.V., Alimhanova T.A., Kitsis V.M. Methodology for assessing the risks of emergencies on the east siberia – pacific ocean oil and gas main pipeline // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. – 2020. – V. 10. – № 1. – P. 13–20. DOI: 10.24247/ijmpedfeb2020
11. Шаммазов И.А., Сидоркин Д.И., Батыров А.М. Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333 – № 12. – С. 200–207. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3832
12. Использование компактных инспекционных приборов для контроля технического состояния трубопроводов в защитных футлярах / М.З. Ямилев, В.В. Пшенин, Д.С. Матвеев, Д.С. Подлесный, Т.И. Безмянников // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – Т. 2. – С. 106–110. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-106-110
13. Estimation of the influence of compressed hydrogen on the mechanical properties of pipeline steels / V.I. Bolobov, I.U. Latipov, G.G. Popov, G.V. Buslaev, Ya.V. Martynenko // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 19. – P. 1–27. URL: <https://doi.org/10.3390/en14196085> (дата обращения: 15.12.2022).
14. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region / M. Dvornikov, G. Buslaev, A. Kunshin, D. Sidorov, A. Kraslawski, M. Budovskaya // *Resources*. – 2021. – V. 10. DOI: 10.3390/resources10010003
15. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – V. 212. – № 12. – P. 2642–2651. DOI: 10.1016/j.jmatprot.2012.07.018
16. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process / A.A. Adeleke, P.P. Kibanni, T.A. Orhadahwe, J.O. Aweda, J.K. Odusote, O.O. Agboola // *Results in Engineering*. – 2019. – V. 4. – P. 100044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044> (дата обращения: 15.12.2022).
17. Бровер А.В. Комплекс механизмов упрочнения металлических материалов при импульсной лазерной обработке // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 1. – С. 63–69.
18. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing / J. Yu, H. Zhang, D. Deng, S. Hao, A. Iqbal // *Chinese journal of mechanical engineering*. – 2014. – V. 27. – № 4. – P. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
19. Liu T.J.C. Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule 4353 heating // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2008. – V. 49. – № 2. – P. 171–184. DOI: 10.1016/j.tafmec.2007.12.001
20. Yuan C.L., Zhong Y.X. Self-healing mechanism of inner crack in plastic deformation under high temperature // *Journal of Plasticity Engineering*. – 2006. – V. 13. – P. 53–57.
21. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time / J.Z. Lu, J.S. Zhong, K.Y. Luo, L. Zhang, H. Qi, M. Luo, X.J. Xu, J.Z. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 221. – P. 88–93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.031
22. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // *Доклады Академии наук СССР*. – 1976. – Т. 227. – № 4. – С. 848–851.
23. Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I. Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields // *Strength of Materials*. – 1983. – V. 15. – № 4. – P. 501–506. DOI: 10.1007/BF01522429
24. Овчинников И.В. Определение ресурса пластичности при воздействии тока // *Проблемы прочности*. – 1993. – № 6. – С. 54–59.
25. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2016 – № 2. – С. 89–110. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07
26. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // *Известия российской академии наук механика твердого тела*. – 2010. – № 3. – С. 188–199. DOI: 10.3103/S0025654410030167
27. Song H., Wang Z., Gao Ti. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2007. – V. 17. – P. 87–92. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60053-3
28. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts / L.B. Zuev, V.Ya. Tselmaer, V.E. Gromov, V.V. Muravev // *Technical Physics* – 1997. – V. 49. – № 2. – P. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
29. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L.B. Zuev, O.V. Sosnin, D.Z. Chirakadze, V.E. Gromov, V.V. Muravev // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 1998. – V. 39. – № 4. – P. 639–641. DOI: 10.1007/BF02471262
30. Rastvorova I.I., Demidovich V.B. Utilization of induction heating in the processing of titanium // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – V. 12. – № 6. – P. 1062–1068.
31. Study of the temperature uniformity of aluminum billets heated by superconducting DC induction heaters / Y. Wang, H. Gao, Z. Li, Y. Ping, Z. Jin, Z. Hong // *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – 2015. – V. 34. – № 1. – P. 357–670. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2014-0076
32. A microstructural study on the alkali-treated titanium subjected to induction heating / X. Chen, R. Zhu, H. Gao, W. Xu, G. Xiao, W. Xu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – V. 20. – P. 281–290. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.088
33. Kukudzhanov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. P. I // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 233–250. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60
34. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. – М.: НТЦ Информтехника, 1992. – 143 с.
35. Кукуджанов К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 138–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09

36. Моделирование воздействия ИМП на несплошности в структуре материалов деталей / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, В.Б. Юдаев, Н.А. Рынгач // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – Т. 2. – С. 80–86.
37. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Л.Д. Мержиевский, Н.А. Рынгач // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2005. – № 18. – С. 97–110.
38. Смыкание несплошностей в структуре материалов деталей при магнитно-импульсной обработке / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Н.А. Рынгач, В.В. Красовский // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2002. – Т. 1. – № 12. – С. 131–140.
39. Баак Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 660–668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660.
40. Цуркин В.Н., Череповский С.С. Экспериментальное исследование воздействия ключевых параметров магнитно-импульсной обработки на величину электромагнитного давления // Литье и металлургия. – 2017. – Т. 1. – № 68. – С. 115–122.
41. Белевитин В.А. Измерение ударной вязкости металлов и сплавов: методические рекомендации. – Челябинск, Изд-во Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2022. – 36 с.

Поступила: 09.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 16.03.2023 г.

Информация об авторах

Щипачев А.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

Алжадли М., аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.692.4.053

MAGNETIC-PULSED TREATMENT TO IMPROVE THE STRENGTH PROPERTIES OF DEFECTIVE SECTIONS OF OIL AND GAS PIPELINES

Andrey M. Schipachev¹,
schipachev_am@pers.spmi.ru

Mohammed Aljadly¹,
mohammedaljadly@gmail.com

¹ St. Petersburg Mining University,
21, line 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

The relevance. During the operation of oil and gas pipelines, continuity defects (including point and linear defects such as delamination, cracks of various nature, etc.) occur in their structure. The peculiarity of material continuity defects is caused by the fact that in the process of loading the defects cause stress concentration near their tops, which leads to a rapid increase in their number and geometric dimensions, followed by the merging of the latter and the formation of large discontinuities, and as a consequence, the strength properties of pipelines decrease. Consequently, early detection of metal continuity defects and their elimination before they reach a critical size are urgent tasks. The solution of which will significantly improve the operational and strength properties of the working elements of pipelines and extend their lifespan.

The main aim of the research is to study the effectiveness of magnetic-pulse treatment to improve the strength properties of used oil and gas pipelines by reducing the defects size.

Objects: defective sections of main oil and gas pipelines.

Methods: magnetic pulse treatment of samples on a magnetic-pulse unit MPU-10-SSAU 10, determination of temperature changes caused by magnetic-pulse treatment, testing samples for impact strength on a pendulum-testing machine, comparison of the obtained results for treated and untreated samples, determination of the effect of magnetic-pulse treatment on the strength properties of gas pipeline metal, study of the fracture surface of samples after impact tests.

Results. It was established experimentally that the impact strength of the treated samples increased by 14 % compared to the untreated samples. Snapshots of the temperature distribution during the magnetic-pulse treatment showed a significant increase in temperature near the crack tips. It was found that destruction of the metal subjected to magnetic-pulse action acquired more viscous character.

Key words:

continuity defects, main gas pipeline, magnetic-pulse field, inductor, thermal compressive stresses, impact strength.

REFERENCES

- Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksin A.I. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool systems in the processing of welded structures from dissimilar steels. *Materials science forum*, 2021, vol. 1022, pp. 7–16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7
- Nosov V.V., Grigoriev E., Peretyatko S., Artyushchenko A.P. Nanotechnologies of strength control of materials. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1040, pp. 101–108. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101
- Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 20, pp. 10636. Available at: <https://doi.org/10.3390/app122010636> (accessed 15 December 2022).
- Perveitalov O.G., Nosov V.V., Borovkov A.I., Khanukhov K.M., Chetvertukhin N.V. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. *Metals*, 2023, vol. 13 (1), no. 4. DOI: 10.3390/met13010004
- Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 48. DOI: 10.3390/app13010048
- Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modeling of a stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 234, pp. 643–646. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.643
- Baktizin R.N., Zaripov R.M., Korobkov G.E., Masalimov R.B. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 242, pp. 160–168. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.160> (accessed 15 December 2022).
- Fetisov V., Tsvetkov P., Müller J. Tariff approach to regulation of the European gas transportation system: case of Nord Stream. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, no. 6, pp. 413–425. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.023> (accessed 15 December 2022).
- Dzhemilev, Shammazov I., Sidorkin D., Mastobaev B., Gumerov A. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections. *Oil Industry*, 2022, vol. 10, pp. 78–82. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.
- Kovshov S.V., Alimhanova T.A., Kitsis V.M. Methodology for assessing the risks of emergencies on the east siberia - pacific ocean oil and gas main pipeline. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 13–20. DOI: 10.24247/ijmperdfeb20202
- Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Batyrov A.M. Ensuring the stability of aboveground trunk pipelines in areas of continuous permafrost distribution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 200–207. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3832.
- Yamilev M.Z., Pshenin V.V., Matveev D.S., Podlesniy D.S., Bezimyannikov T.I. The use of compact inspection devices for monitoring the technical condition of pipelines in protective cases. *Neftyanoe Khozyaystvo-Oil Industry*, 2022, vol. 2, pp. 106–110. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-106-110
- Bolobov V.I., Latipov I.U., Popov G.G., Buslaev G.V., Martynenko Ya. V. Estimation of the influence of compressed hydrogen on the mechanical properties of pipeline steels. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 19, pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14196085> (accessed 15 December 2022).
- Dvoynikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region. *Resources*, 2021, vol. 10. DOI: 10.3390/resources10010003.

15. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, no. 12, pp. 2642–2651. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018.
16. Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Orhadahwe T.A., Aweda J.O., Odusote J.K., Agboola O.O. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process. *Results in Engineering*, 2019, vol. 4, pp. 100044. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044> (accessed 15 December 2022).
17. Brover A.V. Kompleks mekhanizmov uprochneniya metallicheskih materialov pri impulsnoy lazernoy obrabotke [Complex of mechanisms for strengthening metallic materials during pulsed laser processing]. *Perspektivnye Materialy*, 2008, vol. 1, pp. 63–69.
18. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., Iqbal A. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2014, vol. 27, no. 4, pp. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
19. Liu T.J.C. Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule 4353 heating. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2008, vol. 49, no. 2, pp. 171–184. DOI: 10.1016/j.tafmec.2007.12.001.
20. Yuan C.L., Zhong Y.X. Self-healing mechanism of inner crack in plastic deformation under high temperature. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, vol. 13, pp. 53–57.
21. Lu J.Z., Zhong J.S., Luo K.Y., Zhang L., Qi H., Luo M., Xu X.J., Zhou J.Z. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 221, pp. 88–93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.031.
22. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. O vozmozhnosti tormozheniya bystrykh treshchin impulsami toka [Possibility of braking rapid cracks by pulses of current.] *Soviet Physics Doklady*, 1976, vol. 21, no. 4, pp. 216–222.
23. Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I., Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. *Strength of Materials*, 1983, vol. 15, no. 4, pp. 501–506. DOI: 10.1007/BF01522429
24. Ovchinnikov I.V. Opredelenie resursa plastichnosti pri vozdeystvii toka [Determination of the plasticity resource under the action of current]. *Problemy prochnosti*, 1993, vol. 6, pp. 54–59.
25. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Processes of transformation and interaction of microcracks in a metal under the influence of a high-energy pulsed electromagnetic field. *Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2016, vol. 2, pp. 89–110. In Rus. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07.
26. Kukudzhinov K.V., 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, vol. 45, no. 3, pp. 465–475. In Rus. DOI: 10.3103/S0025654410030167.
27. Song H., Wang Z., Gao Ti. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet, *Trans. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, vol. 17, pp. 87–92. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60053-3
28. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., Muravev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. *Technical Physics*, 1997, vol. 49, no. 2, pp. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
29. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Muravev V.V. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 639–641. DOI: 10.1007/BF02471262
30. Rastvorova I. I., Demidovich V. B. Utilization of induction heating in the processing of titanium. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1062–1068.
31. Wang Y., Gao H., Li Z., Ping Y., Jin Z., Hong Z. Study of the temperature uniformity of aluminium billets heated by superconducting DC induction heaters. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2015. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2014-0076
32. Chen X. Zhu R., Gao H., Xu W., Xiao G., Xu W. A microstructural study on the alkali-treated titanium subjected to induction heating. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 20, pp. 281–290. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.088
33. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. P. I. *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 233–250. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolInt.v6.i3.60
34. Talalaev A.K. *Induktory i ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Inductors and systems for magnetic pulse treatment of metals]. Moscow, NTC Informtekhnik Publ., 1992. 143 p.
35. Kukudzhinov K.V. Modeling the impact of a high-energy pulsed electromagnetic field on microcracks in a polycrystalline metal. *Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2015, no. 4, pp. 138–158. In Rus. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09
36. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Yudaev V.B., Ryngach N.A. Modelirovanie vozdeystviya IMP na nesploshnosti v strukture materialov detaley [Modeling the impact of a pulsed-magnetic field on discontinuities in the structure of materials]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2003, vol. 2, pp. 80–86.
37. Kurlaev N.V., Merzhievsky L.D., Yudaev V.B., Ryngach N.A. Vliyaniye impulsnoy obrabotki na defekty sploshnosti i dolgovechnost materialov [Influence of pulsed treatment on continuity defects and durability of materials]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 18, pp. 97–110.
38. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Ryngach N.A., Krasovsky V.V. Smykanie nesploshnostey v strukture materialov detaley pri magnitno-impulsnoy obrabotke [Closure of discontinuity defects of materials during magnetic-pulse processing]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 1, no. 12, pp. 131–140.
39. Baake E., Shpenst V.A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 660–668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660
40. Tsurkin V.N., Cherepovskiy S.S. Experimental study on the impact of key parameters of melt magnetic-pulse treatment on the electromagnetic pressure. *Foundry production and metallurgy*, 2017, vol. 1, no. 68, pp. 115–122. In Rus.
41. Belevitin V.A. *Izmerenie udarnoy vyazkosti metallov i splavov: metodicheskie rekomendatsii* [Measurement of impact strength of metals and alloys: guidelines]. Chelyabinsk, South Ural State Humanitarian and Pedagogical University Publ. House, 2022. 36 p.

Received: 9 January 2023.

Reviewed: 16 March 2023.

Information about the authors

Andrey M. Shipachev, Dr. Sc., professor, St. Petersburg Mining University.
Mohammed Aljadly, postgraduate student, St. Petersburg Mining University.