

DOI: 10.24412/2077-8481-2024-3-81-90

УДК 621.787

А. Н. ЮМАНОВА**В. М. ШЕМЕНКОВ**, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА РАЗЛИЧНОЙ ЧАСТОТЫ ГОРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ УПРОЧНЯЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ**Аннотация**

Рассмотрена возможность формирования высоковольтных частотных импульсов с возможностью регулирования тока в пределах от 50 до 150 кГц. Представлена схема формирования устройства, позволяющего получить более широкие возможности регулирования частоты. Представлены результаты, позволяющие получить представление о влиянии частоты течения тока высоковольтного тлеющего разряда на глубину модифицированного слоя при помощи имитационного моделирования.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, модифицирование, поверхностный слой, упрочнение, имитационное моделирование, частота горения, скин-эффект, активный слой.

Для цитирования:

Юманова, А. Н. Имитационное моделирование воздействия тлеющего разряда различной частоты горения на поверхностный слой упрочняемых изделий / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков / Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – С. 81–90.

Введение

Как известно, тлеющий разряд относится к одному из видов газового разряда, представляющий собой сочетание сложных физических явлений, таких как электрический пробой газа, формирование проводящего канала и прохождением через него электрического тока и формирование магнитного поля вокруг электродного пространства.

Одним из определяющих параметров тлеющего разряда является частота его горения. Как было установлено ранее, частота горения тлеющего разряда в значительной степени влияет на глубину упрочненного слоя [1].

В отличие от классической обработки, где частота разряда является величиной неуправляемой и, как правило, случайной, авторами предложен способ упрочнения изделий из металлов и сплавов, заключающийся в обеспечении управления частотной характеристикой тока тлеющего разряда в пределах

от 1 до 150 кГц [2].

Требуемая частота горения разряда, зависящая от основных электрофизических параметров обрабатываемого материала упрочняемого изделия, определялась [3] в соответствии с формулой

$$\nu = \frac{\rho}{\delta^2 \pi \mu \mu_0}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала изделия, Ом·м; δ – глубина модифицированного слоя, м; μ – магнитная проницаемость материала изделия. К примеру, для стали $\mu \approx 100$ при индуктивности магнитного поля не более 0,002 Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Н·А⁻²; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Для реализации предлагаемого способа используется вакуумная камера с расположенными в ней анодом и катодом, подключенными к специализированному блоку, который обеспечивает горение тлеющего разряда с требуе-

мой частотой.

Схема установки для осуществле-

ния упрочнения представлена на рис. 1.

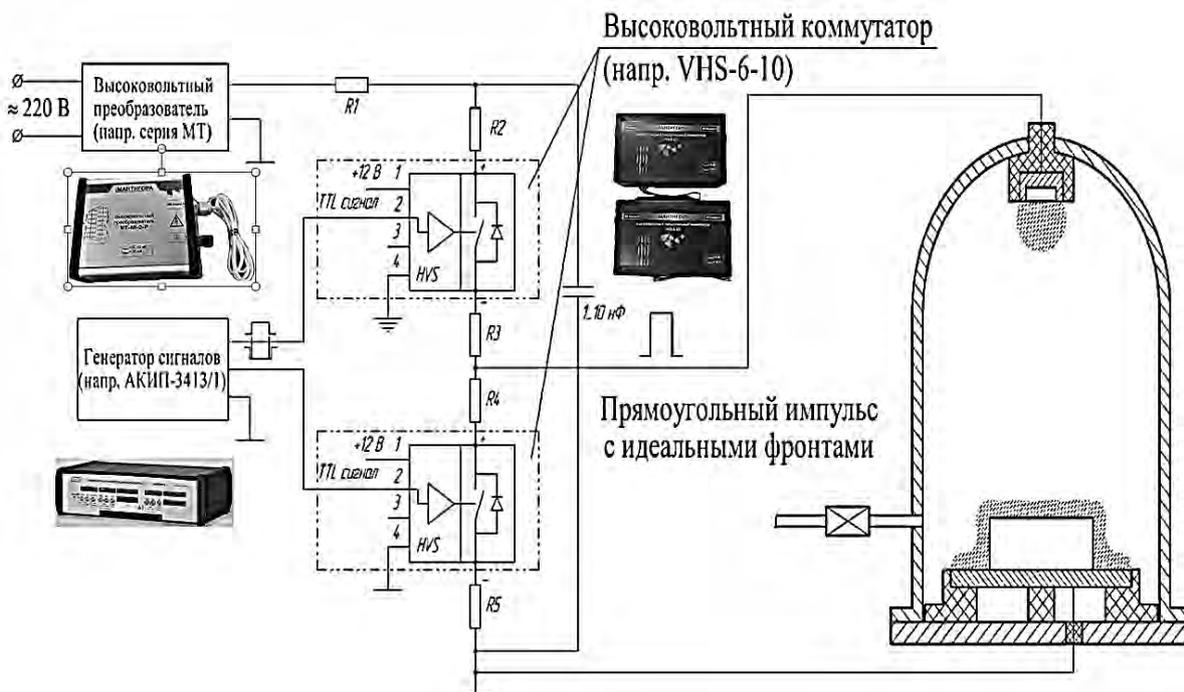


Рис. 1. Схема установки для упрочнения

В качестве генератора частоты принят стандартный серийно выпускаемый генератор TTL-сигнала; в качестве высоковольтного источника питания – источник, состоящий из лабораторного автотрансформатора, повышающего трансформатора и полупериодного преобразователя, либо высоковольтного преобразователя DC-DC.

На генераторе сигналов (АКПП-3413/1) задается частота горения разряда (от 1 до 150 кГц). Гальванически изолированный управляющий драйвер от входных полюсов подключается к высоковольтному коммутатору к плавающим потенциалам в полумостовой схеме. Сигнал подается на высоковольтный твердотельный коммутатор серии VHS-6-10, разработанный по технологии последовательного подключения полевых транзисторов, после чего попадает на усилитель и драйвер для подключения транзистора, который ком-

мутирует высоковольтную цепь. Твердотельный коммутатор серии VHS-6-10 включается и подается коммутируемый ток (можно коммутировать напряжение как положительной, так и отрицательной полярности).

Зная значения величины удельного сопротивления материала упрочняемого изделия, задаваясь необходимой величиной модифицированного слоя по выражению (1), вычисляют требуемую частоту горения тлеющего разряда, которую генерируют с помощью генератора TTL-сигнала [4].

Как показала практика, полученный при обработке по приведенной выше технологической схеме упрочненный слой несколько отличается от расчетного «активного слоя».

Если, например, обратить внимание на результаты дюриметрического анализа образца из стали 20, прошедшего упрочнение при различных частотах

горения разряда (рис. 2), можно увидеть, что упрочненный слой имеет переходную зону, характеризующуюся монотонным уменьшением твердости

по глубине до значений, соответствующих твердости основного материала изделия [5, 6].

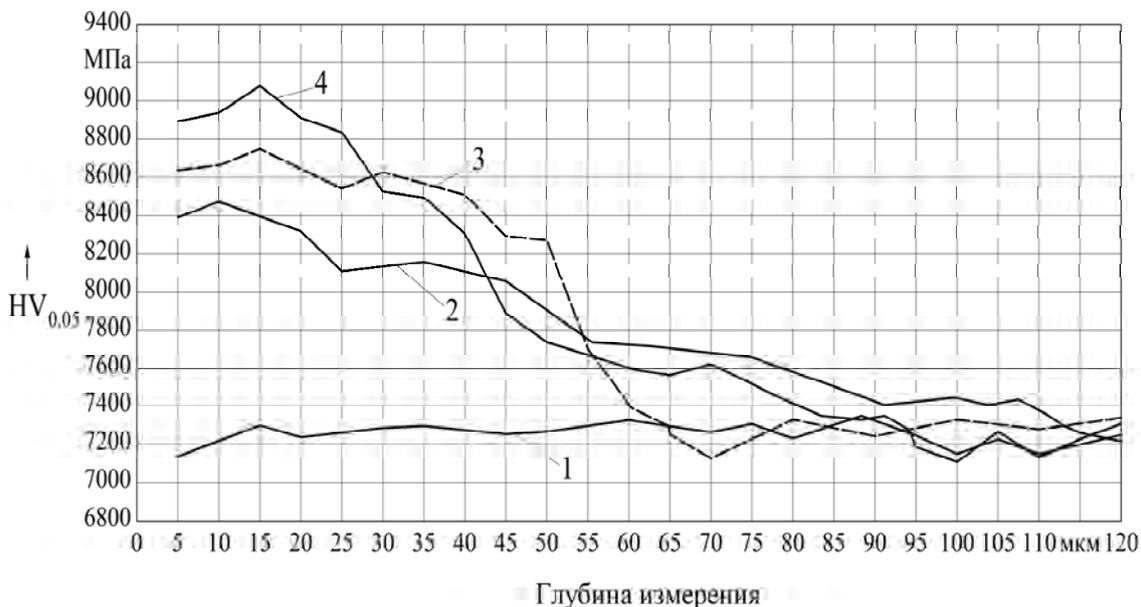


Рис. 2. Микротвердость поверхностного слоя образцов из стали 20: 1 – до обработки; 2 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 50 кГц; 3 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 100 кГц; 4 – после обработки тлеющим разрядом с частотой горения 150 кГц

Если преобразовать выражение (1) и подставить необходимые значения, то получим, что глубина «активного слоя» для стали 20 при обработке тлеющим разрядом с частотой горения 50 кГц составит 90 мкм, при частоте горения 100 кГц – 65 мкм, а при частоте 150 кГц – 55 мкм. При сопоставлении полученных расчетных данных с рис. 2 можно видеть, что выражение (1) выражает полную глубину слоя, полученного на основании возникающего в процессе упрочнения скин-эффекта, и, как правило, не в полной мере отражает реальной картины, т. к. она не учитывает так называемой переходной зоны, в которой твердость снижается от значений, соответствующих упрочненной зоне, до твердости, соответствующей твердости основного материала [7].

Таким образом, опираться только на представленную зависимость при описании процесса формирования

упрочненного слоя является не совсем точным.

Параметрическое моделирование, позволяющее в полной мере получить полную картину упрочнения импульсным разрядом, связано с рядом трудностей. Прежде всего, это большое количество параметров, которые необходимо учитывать при создании аналитической системы. Геометрия разряда, ток и напряжение, давление и вакуумная система, газовый состав, условия генерации ионов из разрядного пространства и многие другие параметры необходимо учитывать и регистрировать для получения сильного и стабильного аналитического сигнала. Многие такие процессы экспериментально сложно и трудоёмко исследовать. Ещё одной трудностью является интерпретация полученных эмпирических данных, т. к. обычно измеряемые величины определяются совокупностью нескольких явлений, за-

частую неизвестных и неожиданных, выделить из которых главное не представляется возможным. Всё это делает весьма трудной разработку подобной аналитической системы без её теоретической модели.

На данный момент существует ряд методов, позволяющих моделировать тлеющий разряд постоянного тока и радиочастотный разряд. Однако они не применимы к моделированию процессов в импульсном тлеющем разряде, т. к. принципиально созданы для расчета стационарного режима горения плазмы и не могут моделировать динамические характеристики процессов в импульсном тлеющем разряде. Методов же, позволяющих удовлетворительно моделировать импульсный тлеющий разряд, до сих пор не существовало.

Модели, описывающие процессы в импульсном тлеющем разряде, весьма сложны и поэтому появляется необходимость использования профессиональных пакетов численного моделирования. Одним из таких пакетов является ANSYS, который основан на методе конечных элементов, с помощью которого можно производить все необходимые при моделировании процесса упрочнения вычисления.

Основная часть

Для решения поставленной задачи использовалась среда ANSYS Workbench, где реализована возможность связанного совмещенного анализа термоэлектрических процессов [8]. Решить задачу в других стандартных модулях не представляется возможным, т. к. в них невозможно задать параметры процесса упрочнения, а особенно параметры горения плазмы тлеющего разряда между анодом и катодом. Моделирование процесса осуществлялось по следующему алгоритму.

1. При моделировании электромагнетизма использовался модуль ANSYS Maxwell, который обладает расширенными возможностями для опре-

деления электрических параметров различных процессов.

2. Полученные результаты переданы в модуль для решения нестационарных термических задач – ANSYS Transient Thermal.

3. Параллельное связанное решение задачи для получения более точного результата.

4. Моделирование возникающей электромагнитной индукции и распределения плотности тока в поверхностном слое упрочняемого изделия осуществлялось в модуле ANSYS Electronic Desktop Maxwell.

Образец для моделирования представляет собой объемное тело в виде параллелепипеда с геометрическими размерами $100 \times 100 \times 50$ мм. Данные размеры образца позволяют определить действие обработки тлеющим разрядом как на поверхности изделия, так и на его глубине. В качестве основного материала образца для моделирования задавалась конструкционная сталь 20 и быстрорежущая сталь P18 с физическими, механическими и электромагнитными свойствами, взятыми из расширенной библиотеки материалов ANSYS Granta Materials.

Выбор сталей обусловлен необходимостью проверки теории об одинаковом влиянии тлеющего разряда на разнообразные изделия из различных сталей.

В табл. 1 представлены основные физические свойства используемых сталей.

Размер катода принят равным размеру катода реально существующей вакуумной установки 400×500 мм.

Начальные и граничные условия задавались на основании закрепления образца и элементов имитационной модели в пространстве, а также параметров взаимодействия с окружающей вакуумной средой исследуемой области.

Передача энергии от анода к катоду в условиях низкого вакуума моделировалась путем настройки модуля Мах-

well Eddy Current в категории Boundaries, доступные для редактирования в

ANSYS Electronic Desktop [9, 10].

Табл. 1. Основные физические свойства сталей при температуре 20 °С

Сталь	Удельное электрическое сопротивление ρ , $10^8 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Модуль упругости E , $10^3 \cdot \text{МПа}$	Удельный вес ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Удельная теплоемкость C , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$
Сталь 20	16,9	44...46	2,13	7859	486
P18	41,9	26...27	2,28	8800	420

Для получения полной картины влияния частоты горения разряда на поверхностный слой обрабатываемой детали необходимо моделирование провести по нескольким частотам. Таким образом, принимаем следующий ряд частот: 25, 50, 100 и 150 кГц.

Кроме того, для полноты картины при моделировании принимаем следующий ряд тока тлеющего разряда: 25, 50, 100 и 150 мА.

При моделировании процесса использовался метод конечных элементов, основанный на аппроксимации непре-

рывной величины, определенной бесконечным числом значений, дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

В работе в качестве конечных элементов применялся трехмерный тетраэдральный конечный элемент, который, как правило, применяется для расчета пространственных тел, имеющих трехосное напряженное состояние (рис. 3).

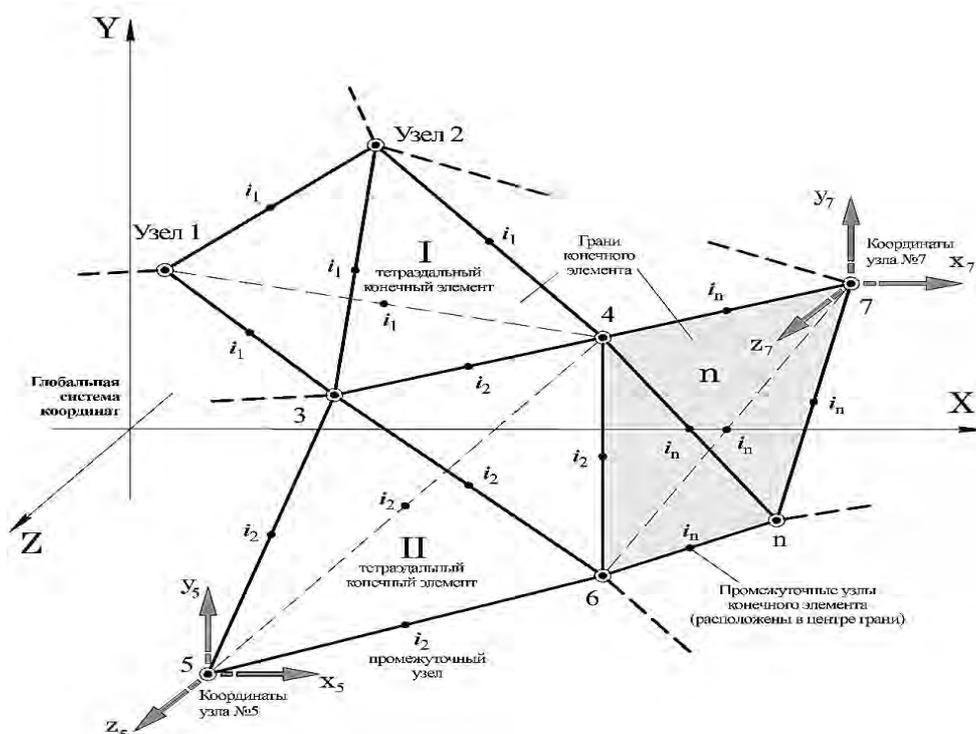


Рис. 3. Конечные элементы, используемые при имитационном моделировании

Данный вид конечных элементов позволяет увеличить количество степеней свободы элемента без увеличения количества его узлов. Применение полного кубического интерполяционного полинома и увеличенного количества степеней свободы позволяет получить высокую точность результатов.

Сетка конечных элементов имела различную размерность для каждого из элементов модели. Это связано с тем, что использование слишком малых значений размера конечных элементов

приводит к существенному увеличению времени расчета, поэтому минимальный размер в 1 мм задавался только в образце для упрочнения. Важным параметром настройки сетки образца являлся учет возникновения скин-эффекта, который позволяет автоматически менять программе размер конечных элементов вблизи поверхностей. В этом случае точность разбиения одного элемента повышается в 5 раз, т. е. финальный размер может быть 0,2 мм (рис. 4).

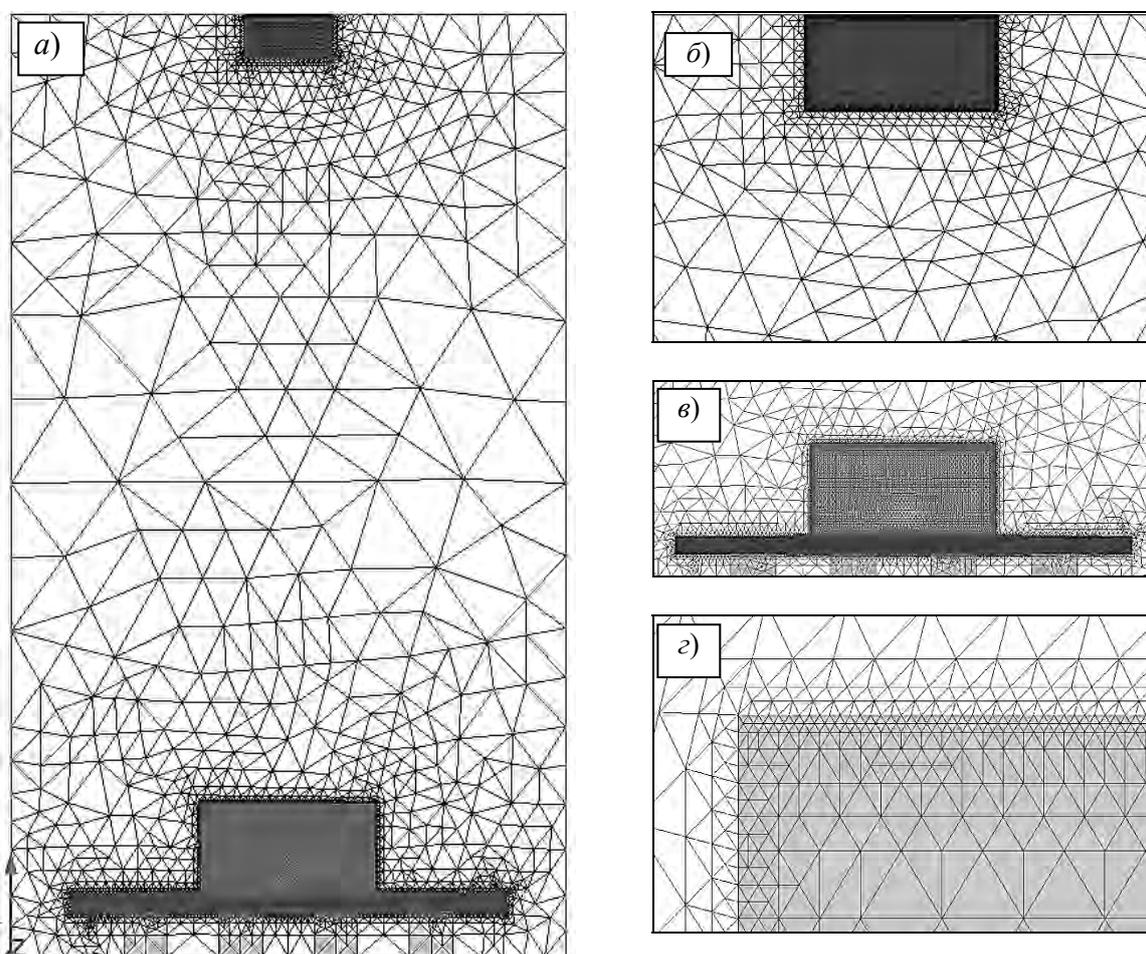


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса обработки импульсным тлеющим разрядом: *a* – полная картина сетки конечных элементов процесса обработки; *б* – фрагмент сетки конечных элементов анода; *в* – фрагмент сетки конечных элементов стола-катода и детали; *г* – фрагмент сетки конечных элементов поверхности детали

Результаты моделирования

В результате моделирования процесса воздействия тлеющего разряда

различной частоты горения на поверхностный слой установлено, что плотность тока J , A/m^2 , текущего в поверхностном слое упрочняемого изделия,

является неоднородной. Как видно из представленных результатов моделирования (рис. 5–12), несмотря на материал упрочняемого изделия поверхностный «активный» слой можно разделить на два основных участка. Первый участок характеризуется постоянной плотностью

тока по глубине (глубина «активного воздействия»), а второй участок отличается наличием градиентного уменьшения плотности тока. Имеется также и третий участок, не входящий в «активный» слой, характеризующийся отсутствием течения тока.

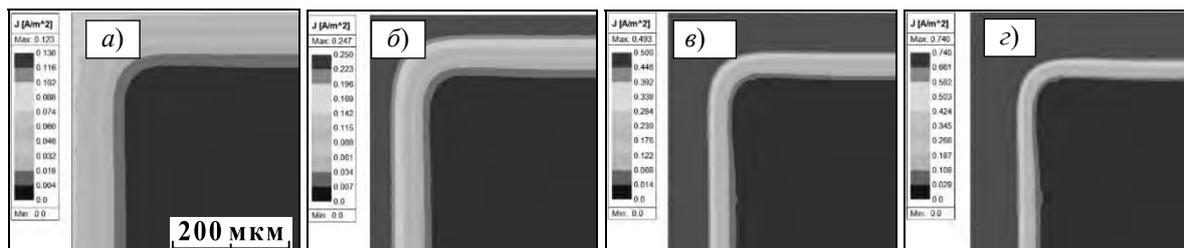


Рис. 5. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 25 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

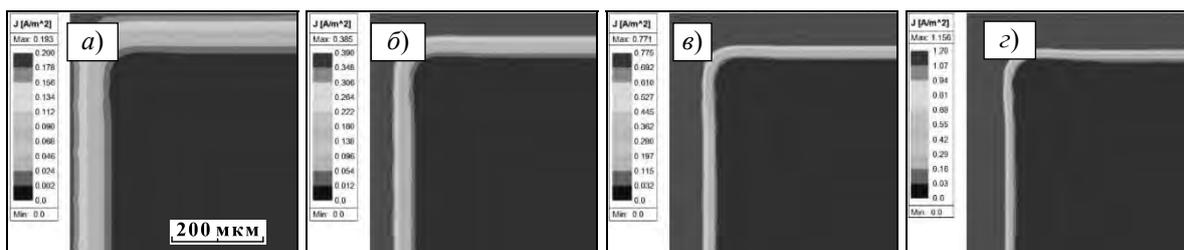


Рис. 6. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 50 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

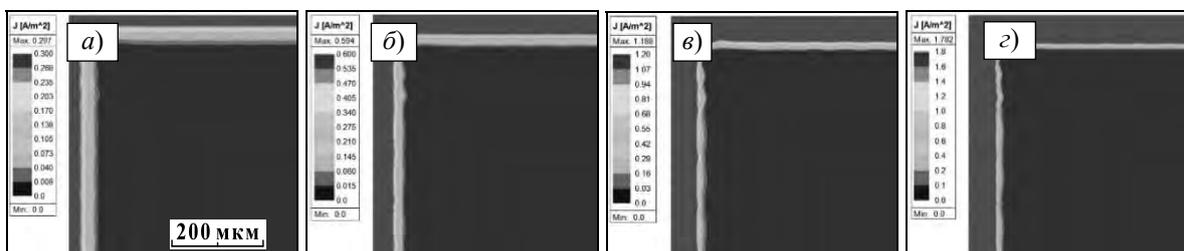


Рис. 7. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 75 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; з – с силой тока 150 мА

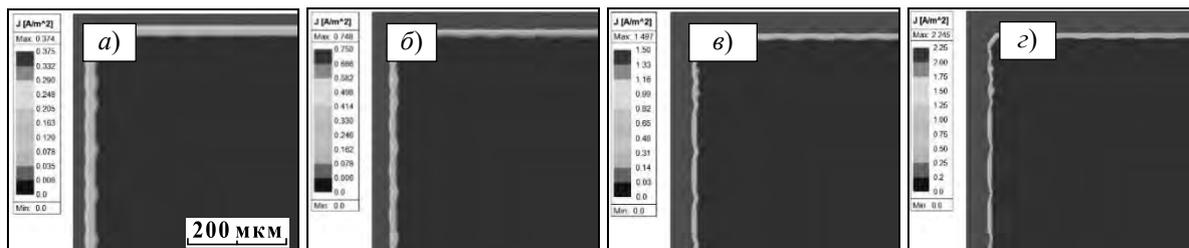


Рис. 8. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали 20 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 150 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

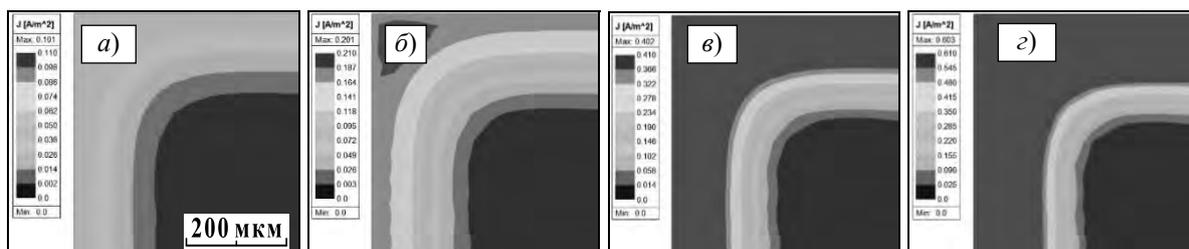


Рис. 9. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 25 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

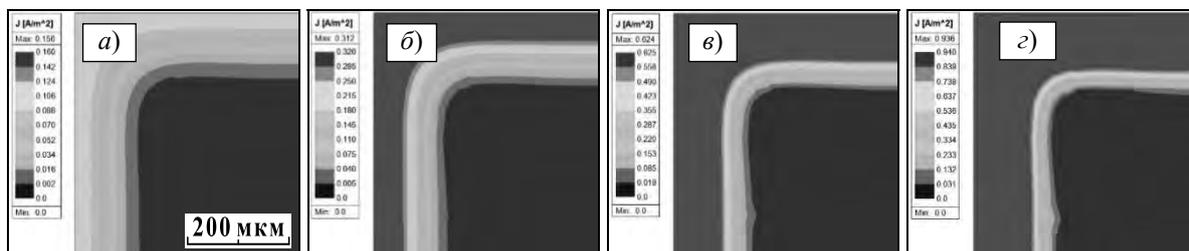


Рис. 10. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 50 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

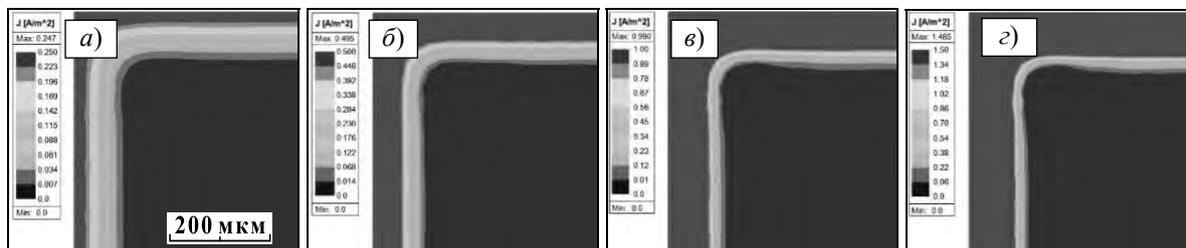


Рис. 11. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 100 кГц: а – с силой тока 25 мА; б – с силой тока 50 мА; в – с силой тока 100 мА; г – с силой тока 150 мА

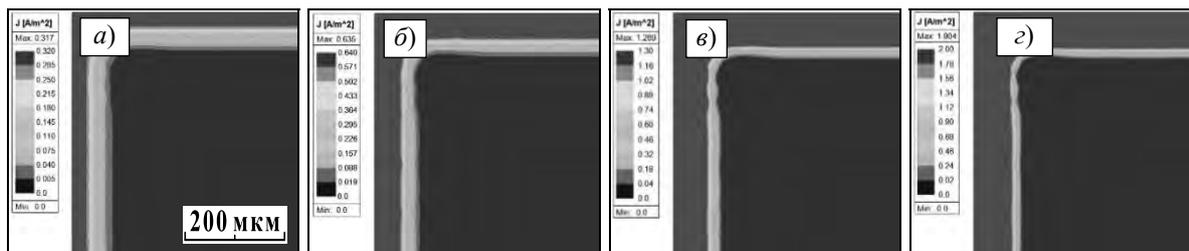


Рис. 12. Изменение плотности тока по глубине поверхностного слоя образца из стали P18 при воздействии на него тлеющего разряда частотой 150 кГц: *а* – с силой тока 25 мА; *б* – с силой тока 50 мА; *в* – с силой тока 100 мА; *г* – с силой тока 150 мА

Как видно, частота и сила тока оказывает существенное влияние на картину распределения плотности тока по глубине. С ростом силы тока величина второго участка уменьшается в пользу первого. Кроме этого, рост частоты тока дополнительно приводит к уменьшению «активного» слоя.

На основании совместного анализа результатов дюриметрического исследования поверхностного слоя (см. рис. 2) и моделирования воздействия тлеющего разряда различной частоты горения на поверхностный слой стали 20 (см. рис. 5–8) можно заметить, что они идентичны. Таким образом, можно сделать предположение, что плотность тока, текущего в поверхностном слое, в процессе упрочнения тлеющим разрядом напрямую оказывает влияние на изменение его твердости.

Выводы

Плотность тока, текущего в поверхностном слое изделия при упрочне-

нии, напрямую зависит от частоты тлеющего разряда.

Материал изделия не влияет на картину распределения плотности тока по глубине поверхностного тока, которая выражается в наличии двух основных участков, характеризующихся постоянной плотностью тока по глубине и градиентного уменьшения плотности тока.

Сила тока тлеющего разряда оказывает существенное влияние на изменение баланса между участками. С ростом силы тока величина участка градиентного уменьшения плотности тока уменьшается в пользу участка с постоянной плотностью тока.

Тенденции изменения твердости и плотности тока по глубине поверхностного слоя идентичны, что дает право утверждать о том, что величина плотности тока, текущего в поверхностном слое, в процессе упрочнения тлеющим разрядом напрямую оказывает влияние на изменение его твердости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шеменков, В. М.** Инженерия поверхностного слоя инструментальной оснастки тлеющим разрядом: монография / В. М. Шеменков, М. А. Рабыко, А. Н. Юманова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – 250 с.
2. Способ упрочнения изделия из металла или сплава: пат. ВУ 24296 / В. М. Шеменков, А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко. – Оpubл. 20.06.2024.
3. **Шеменков, В. М.** Структурно-фазовое преобразование материалов тлеющим разрядом / В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, И. И. Маковецкий // Вестн. Объед. ин-та высоких температур. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 12–18.
4. **Елисеева, А. Н.** Особенности формирования модифицирования поверхностных слоев на детали из сталей импульсным тлеющим разрядом / А. Н. Елисеева, В. М. Шеменков // Высокие технологии в

машиностроении: материалы XVIII Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – С. 218–220.

5. Юманова, А. Н. Формирование упрочненных поверхностных слоев у изделий из сталей импульсным тлеющим разрядом [Электронный ресурс] / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // Инновац. технологии в машиностроении: электрон. сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, 18–19 апр. 2023 г. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 156–158.

6. Елисеева, А. Н. Установление влияния частоты горения импульсного тлеющего разряда на глубину структурно-фазовых превращений в быстрорежущих сталях / А. Н. Елисеева, М. А. Рабыко, В. М. Шеменков // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию ИМИ–ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», Сарapul, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – С. 137–139.

7. Юманова, А. Н. К вопросу определения глубины модифицированного слоя, формируемого обработкой импульсным тлеющим разрядом / А. Н. Юманова, В. М. Шеменков // 56-я Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. – Витебск: Витеб. гос. технол. ун-т, 2023. – С. 246–247.

8. ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide: руководство по моделированию контакта ANSYS механика // Ansys inc. – Канонсберг, 2017. – Вып. 18.2. – 257 с.

9. Nakasone, Y. Engineering Analysis with ANSYS Software / Y. Nakasone, S. Yoshimoto, T. A. Stolar-ski. – Elsevier, 2006. – 456 p.

10. Yongyi, Zhu. Best Practices for Contact Modeling using ANSYS [Electronic resource] / Zhu Yongyi. – Mode of access: <https://pic.huodongjia.com/ganhuodocs/2017-09-15/1505456086.9.pdf>. – Data of access: 10.05.2024.

Статья сдана в редакцию 14 июня 2024 года

Контакты:

www.anuta994@mail.ru (Юманова Анна Николаевна);
vshemenkov@yandex.by (Шеменков Владимир Михайлович).

H. M. YUMANOVA, V. M. SHEMENKOV

SIMULATION MODELING OF THE IMPACT OF A PULSED GLOW DISCHARGE ON THE SURFACE LAYER OF STENGTHENED PRODUCTS

Abstract

The possibility of forming high-voltage frequency pulses which makes current regulation in the range from 50 to 150 kHz possible is considered. A diagram of formation of the device to provide wider possibilities for frequency control is given. The results are presented, which allow getting an idea how the frequency of current flow of a high-voltage glow discharge effects the depth of the modified layer using simulation modeling.

Keywords:

glow discharge, modification, surface layer, strengthening, simulation modeling, combustion frequency, skin effect, active layer.

For citation:

Yumanova, H. M. Simulation modeling of the impact of a pulsed glow discharge on the surface layer of stengthened products / H. M. Yumanova, V. M. Shemenkov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2024. – № 3 (84). – P. 81–90.