

## MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.785.5

**А. И. Веремейчик**, кандидат физико-математических наук, доцент,  
**М. И. Сазонов**, доктор технических наук, профессор,  
**А. Н. Парфиевич**, кандидат технических наук, доцент,  
**С. Р. Онысько**, кандидат технических наук, доцент,  
**В. М. Хвисевич**, кандидат технических наук, доцент,  
**А. Е. Желткович**, кандидат технических наук, доцент,  
**М. В. Хеук, А. В. Мартынов**

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,  
ул. Московская, 267, 224023 Брест, Республика Беларусь

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛИ X12МФ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Повышение ресурса работы штамповой оснастки, металлообрабатывающего инструмента, деталей машин и механизмов является актуальной проблемой. Одним из таких методов является использование термообработки поверхностей плазменными источниками нагрева, которые не требуют нагрева всей детали, а лишь модифицируют ее поверхностные слои, оставляя свойства сердцевины неизменными благодаря высоким скоростям нагрева-охлаждения. В статье проведены экспериментальные исследования влияния поверхностного плазменного упрочнения на свойства стали X12МФ. Определена микротвердость образцов, построены профилограммы и топография поверхности после обработки с оплавлением и без оплавления. Для определения температурного поля и установления оптимальных режимов термообработки выполнено компьютерное моделирование процесса поверхностного упрочнения в среде ANSYS Workbench. По результатам решения задачи теплопроводности получено распределение температуры в зоне термического влияния лазерного луча, зависимости температуры от времени и координат.

**Ключевые слова:** сталь; плазменное упрочнение; микротвердость; профилограмма; температурное поле; образец; моделирование.

Рис. 10. Табл. 1. Библиогр.: 13 назв.

**A. I. Verameichyk**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,  
**M. I. Sazonov**, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**A. N. Parfievich**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**S. R. Onysko**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**V. M. Khvisevich**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. E. Zheltkovich**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**M. V. Heuk, A. V. Martynov**  
Educational Institution “Brest State Technical University”,  
267 Moskovskaya Str., 224023 Brest, the Republic of Belarus

### STUDY OF CR12MOV STEEL AFTER SURFACE PLASMA HARDENING

Increasing the service life of stamping tooling, metalworking tools, machine parts, and mechanisms is a pressing issue. One such method is surface heat treatment using plasma heat sources, which do not require heating the entire part but merely modify its surface layers, leaving the core properties unchanged due to high heating and cooling rates. This article presents an experimental study of the effect of surface plasma hardening on the properties of CR12MOV steel. The microhardness of the samples was determined, and profilograms and surface topographies were constructed after processing with and without reflow. Computer modeling of the surface hardening process in ANSYS Workbench was

performed to determine the temperature field and establish optimal heat treatment conditions. Based on the thermal conductivity problem, the temperature distribution in the heat-affected zone of the laser beam, as well as the temperature dependence on time and coordinates, were obtained.

**Key words:** steel; plasma reinforcement; micro hardness; profiled graph; temperature field; sample; simulation.  
Fig. 10. Table 1. Ref.: 13 titles.

**Введение.** Одним из наиболее широко применяемых методов поверхностного упрочнения металлов является плазменная обработка [1—8]. В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи (дуги) включает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие. Закалка сталей нагревом концентрированными потоками энергии заключается в образовании аустенитной структуры при нагреве и дальнейшем превращении ее в мартенсит на стадии охлаждения при высоких скоростях. Такое упрочнение характеризуется: глубиной закалки до 0,7...1,0 мм; значительно более высокой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя, чем при объемной закалке; незначительными термическими деформациями металла благодаря локальности воздействия и высоким скоростям нагрева-охлаждения.

**Методология и методы исследования.** Для реализации упрочнения поверхностного слоя образцов из стали X12МФ методом локальной плазменной закалки использована установка МПУ-4. В таблице 1 приведен химический состав стали.

Обработка проводилась с помощью плазмотрона, приведенного на рисунке 1. Основными деталями плазмотрона являются катод 1, сопло 2, дополнительное сопло 4, кольцо закрутки рабочего газа 3, кольцо закрутки защитного газа 5, тогда как анодом дуги служит образец 6. В качестве катода использован вольфрамовый стержень диаметром 1,4 мм. Катод охлаждается потоком рабочего газа. Сопло 2 служит для формирования так называемой плазменной дуги (дуги, горящей в потоке аргоновой плазмы). Локальность нагрева и высокая плотность теплового потока в анодном пятне достигаются за счет интенсивного охлаждения водой медного сопла, причем внутренний диаметр сопла может варьироваться в пределах 0,8...1,9 мм.

Защита от окисления упрочняемого металла обеспечивается постановкой в плазмотроне дополнительного керамического сопла 4 с внутренним диаметром 18 мм, а между соплами 2 и 4 подается защитный газ (азот) с расходом 1,2...4,0 л / мин. Кроме того, за счет высокой скорости течения плазмы в дуге происходит эжекция азота в зону анодного пятна, что может привести к плазменному азотированию поверхностного слоя детали и подтверждается исследованиями физических свойств этого слоя [9].

Выпрямитель 8 включен между катодом 1 и упрочняемой деталью 6. Для поджига основной дуги использован высокочастотный генератор 7 малой мощности, включенный между катодом и соплом 2 плазмотрона. После поджига дежурной дуги по ее проводящему каналу загорается основная дуга между катодом и деталью-анодом. Перед включением плазмотрона в зону катода для его защиты подается аргон с расходом 1,2...4,1 л / мин, а для защиты детали в зоне анодного пятна от окисления через дополнительное сопло 4 — азот с расходом 0,8...2,4 л / мин.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав стали X12МФ

Массовая доля элемента, %							
C	Si	Mn	Cr	Cu	V	Mo	Ni
1,45...1,65	0,1...0,4	0,15...0,45	11,0...12,5	До 0,3	0,15...0,30	0,4...0,6	До 0,35

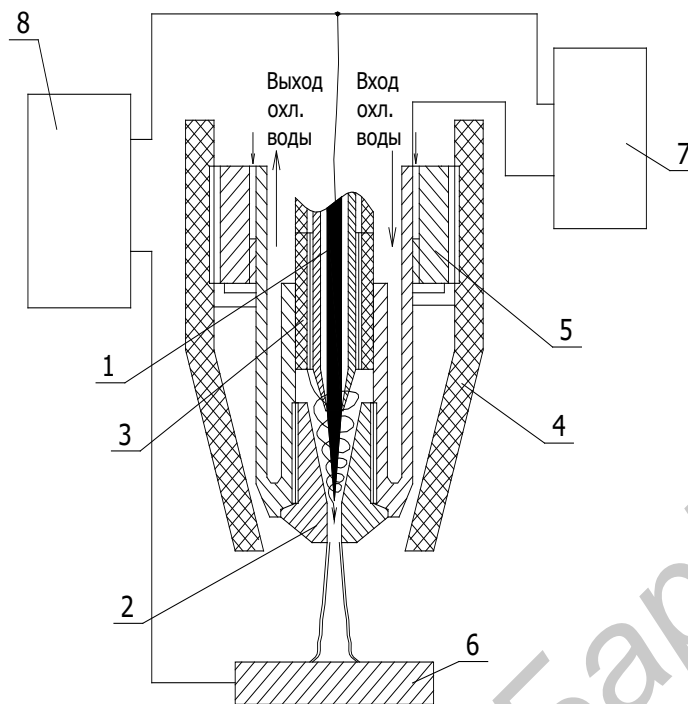


Рисунок 1. — Принципиальная схема плазмотрона

При закалке использовались аргон и азот высокой чистоты из баллонов при давлении газов 150 атм. Измерение расходов газов производится при помощи ротаметров типа РМ-0,025 и РМ-0,63.

Исследование вольт-амперных характеристик дуги, горящей в плазмотроне, проводили с применением вольтметра типа М42100, подключенного к катоду и упрочняемой детали (аноду), ток измеряли с помощью амперметра М42100. Расходы плазмообразующего газа (аргона) регистрировали расходомером типа РМ-063, а защитного газа (азота) — расходомером типа РМ-0063 ГУЗ. Измерение температуры холодной и подогретой в плазмотроне воды осуществляли термометром типа ТЛ-4.

Для обеспечения стабильной скорости и расстояния между соплом и обрабатываемым образцом, а также возможности быстрого и точного их изменения применялась экспериментальная установка, состоящая из роботизированного комплекса Advercut K6090T с разработанным к нему узлом крепления плазменного генератора (рисунок 2).

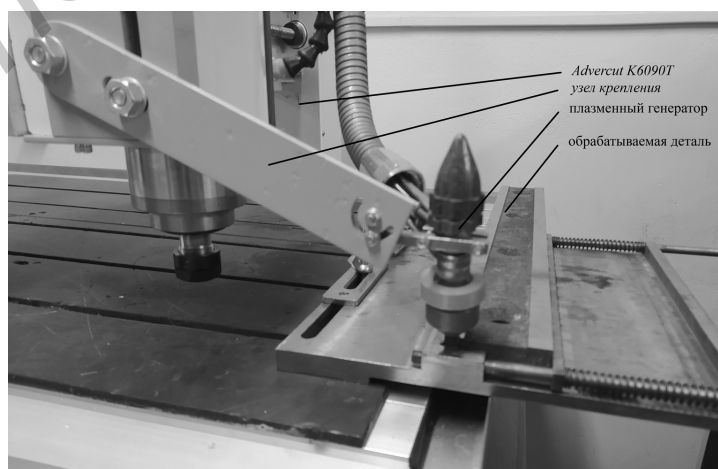


Рисунок 2. — Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменного упрочнения

**Результаты исследования и их обсуждение.** В результате скоростного локального нагрева поверхности плазменной дугой до высоких расчетных температур и дальнейшего охлаждения изделия, которое достигается высокоскоростным отводом тепла во внутренние его слои, в материале происходят структурные превращения. Так как объем нагреваемого под дугой металла мал, происходит быстрый отвод тепла в тело образца. Исследование скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от режимов работы плазмотрона проведено в работе [10]. При воздействии высококонцентрированного источника тепла в зоне термического влияния образуется мартенситно-аустенитная структура. Следует отметить, что структурные превращения при плазменном упрочнении происходят в основном аналогично объемной закалке, однако высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к увеличению плотности дислокаций и термонапряжений в кристаллической решетке, что существенно увеличивает твердость поверхностного слоя. Основное достоинство плазменной закалки заключается в существенном увеличении твердости приповерхностного слоя изделия и сохранении исходных свойств металла в его внутренних слоях, что повышает сопротивление усталости и изнашиванию детали и что недостижимо при традиционных методах упрочнения. Процесс плазменного упрочнения может осуществляться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Во втором случае упрочненная зона не требует финишной обработки.

На рисунке 3 приведен образец после термообработки плазменной дугой.

На рисунке 4 показана микроструктура поверхности упрочненной зоны образца в зависимости от режимов плазменной закалки. На каждой дорожке произведено девять замеров микротвердости с помощью твердомера KASON-59-HV-W. Точки промеров распределены по длине следующим образом: по три точки вначале участка (слева), по центру (центр), в конце участка (справа).

Данные, полученные при измерении микротвердости в поперечном сечении дорожек, показаны на рисунке 4.

Результаты, полученные при измерении твердости в поперечном сечении дорожки и по глубине, показаны на графиках (рисунки 5—7).

Эксперименты показали, что микротвердость поверхности стали неоднородна, ее распределение по ширине зоны влияния плазменной дорожки подчинено определенному закону. Глубина упрочняемого слоя изменяется в пределах 0,15...0,70 мм в зависимости от параметров процесса. Увеличение скорости движения плазменной дуги приводит к уменьшению глубины упрочняемого слоя и наоборот.

Установлено, что на глубине около 0,6 мм находится граница зоны упрочнения, микротвердость находится в пределах 200...300 HV<sub>0,2</sub>.

На рисунке 8 приведены профилограммы образца после упрочнения.

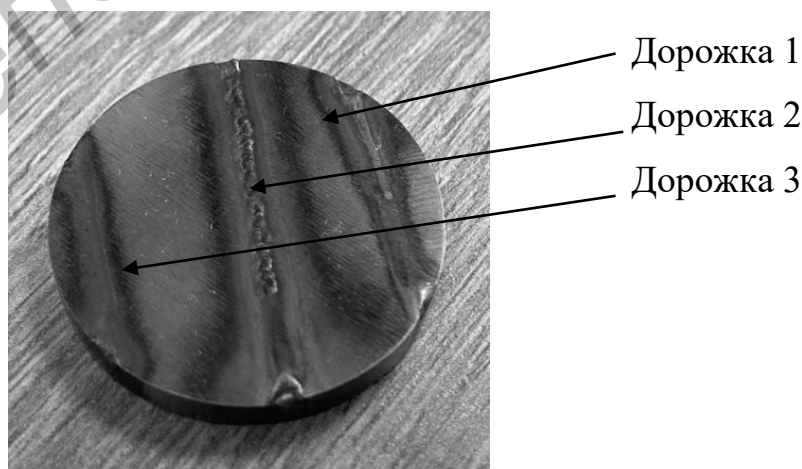
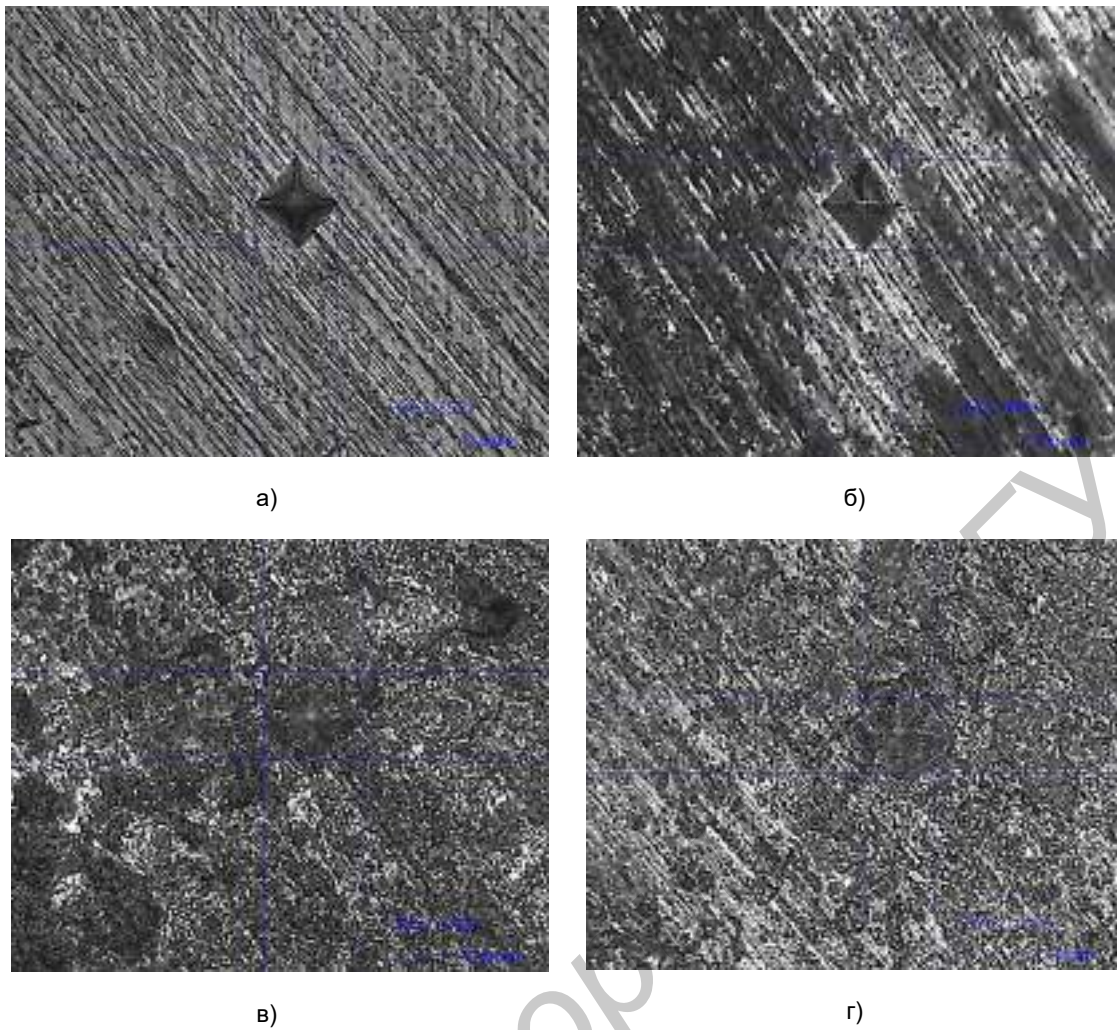
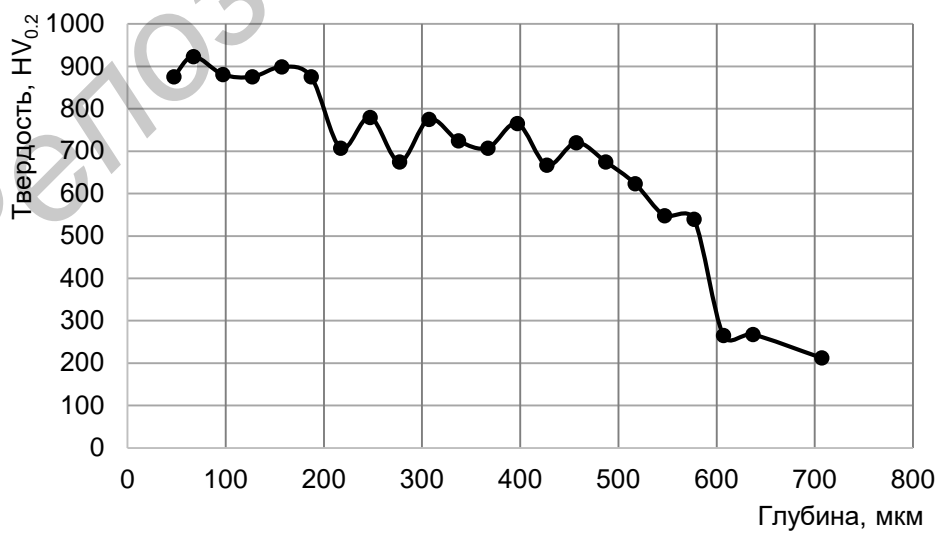


Рисунок 3. — Обработанный образец из стали X12МФ



а — необработанный образец; б — дорожка 1; в — дорожка 2; г — дорожка 3

**Рисунок 4. — Замеры микротвердости образца**



**Рисунок 5. — Зависимость микротвердости от глубины для дорожки 2 с оплавлением поверхности**

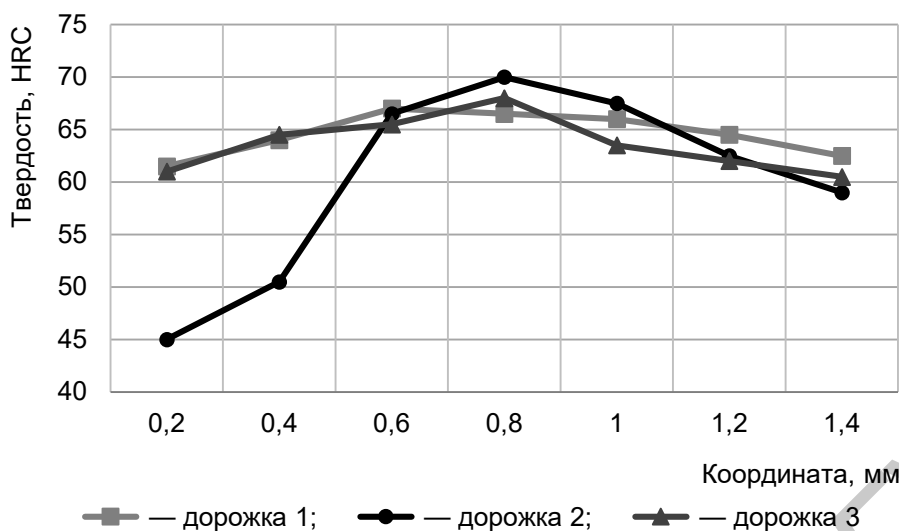


Рисунок 6. — Распределение твердости по ширине зоны влияния плазменной дуги,  $I = 7A$ ,  $V = 10 \text{ мм / с}$

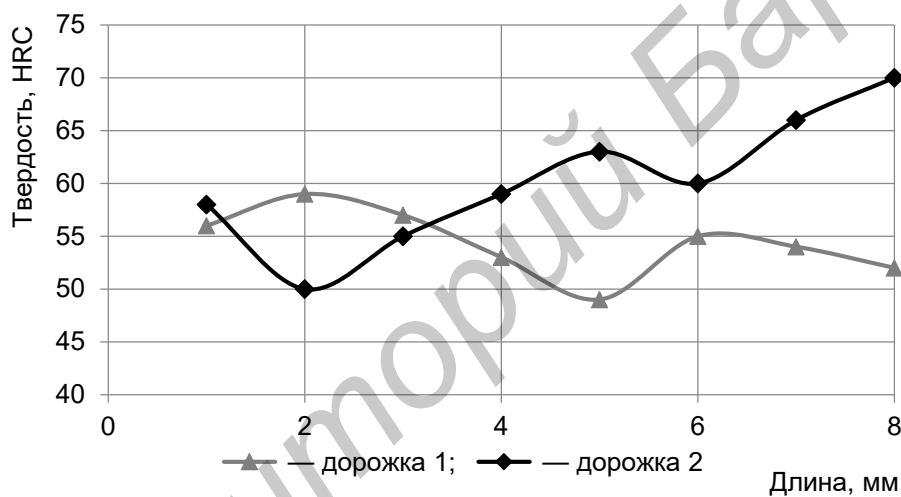
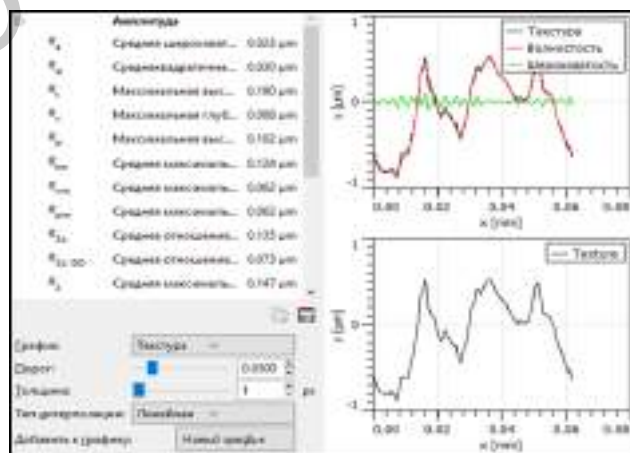


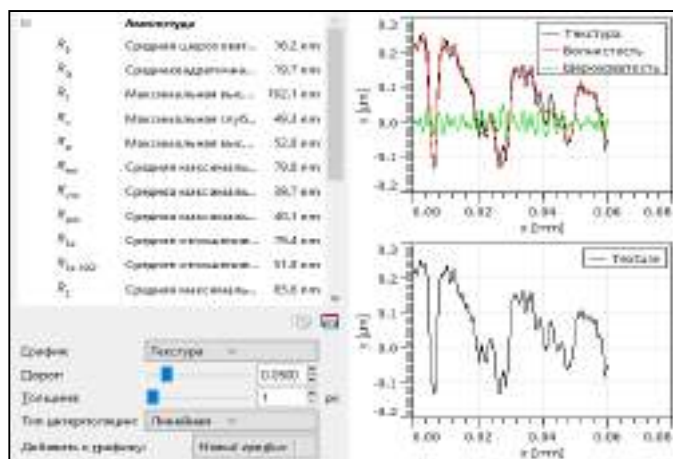
Рисунок 7. — Распределение твердости по длине дорожки,  $V = 10 \text{ мм / с}$



а)

а — дорожка 2; б — дорожка 3

Рисунок 8. — Профилограммы поверхности образца из стали X12MФ после обработки



б)

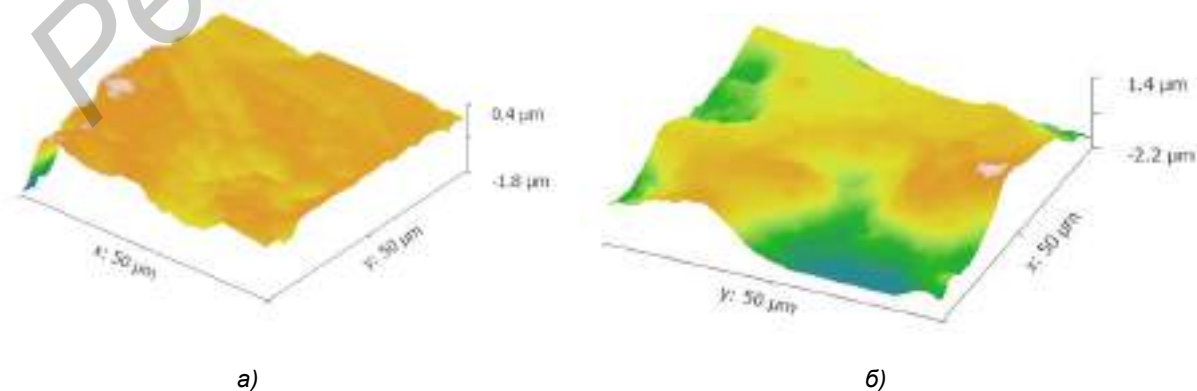
Окончание рисунка 8

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности порядка  $Ra = 0,2$  мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой [11].

Поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. Профилограмма такого образца вследствие высокой детализации и малой площади поверхности измерения ( $50 \times 50$  мкм), полученная на атомно-силовом микроскопе FM-Nanoview 1000 AFM, не отражает гребни и впадины (рисунок 9).

При упрочнении без оплавления наблюдается уменьшение шероховатости предположительно вследствие сглаживания микронеровностей под действием концентрированного источника тепла. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.

*Моделирование процесса термоупрочнения в ANSYS.* Для разработки оптимальных режимов термообработки проведены исследования температурных полей при упрочнении образцов с помощью конечно-элементной расчетной платформы ANSYS Workbench 2019 R2. Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля ANSYS SpaceClaim.



а)

б)

Рисунок 9. — Топография поверхности образца после упрочнения: а — без оплавления поверхности; б — с оплавлением поверхности

Сетка построена при помощи модуля Mesh. В зоне воздействия локального источника тепла, моделирующего процесс воздействия плазмы, с помощью команды Edge Sizing задается уплотненная сетка. Все физические и термодинамические свойства стали X12МФ (плотность  $\rho = 7\,700 \text{ кг / м}^3$ , удельная теплоемкость  $c = 460 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{°C)}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 24 \text{ Вт / (м} \cdot \text{°C)}$ ) задавались с помощью модуля управления материалами, представленного в ANSYS Workbench элементом Engineering Data, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Распределение температурных полей в образце при модифицировании поверхности движущимся источником нагрева определяется из уравнения Фурье:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad}T) = q_v, \quad (1)$$

где  $C_v = C_p \rho$  — удельная объемная теплоемкость, Дж / (м<sup>3</sup> · °C),  $C_p$  — удельная массовая теплоемкость, Дж / (кг · °C),  $\rho$  — плотность материала, кг / м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °C);  
 $q_v$  — объемная плотность теплового потока источника тепла, Вт / м<sup>3</sup>.

При нагреве образца движущимся тепловым источником мощностью  $P$  радиуса  $r$  с учетом зависимости теплофизических характеристик материала от температуры, дифференциальное уравнение теплопроводности (1) примет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + v \rho C_p \text{grad}T - \text{div}(\lambda \text{grad}T) = q_v,$$

где  $v$  — скорость движения источника тепла, м / с.

Граничные условия вне зоны действия пятна теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_0 - T),$$

где  $\alpha$  — коэффициент конвекции, Вт / (м<sup>2</sup> · °C);  
 $T_0$  — температура окружающей среды, °C,  $T_0 = 20 \text{ °C}$ .

Начальная температура принималась равной температуре окружающей среды.

В соответствии со скоростью движения пятна нагрева к узлам конечно-элементной модели последовательно прикладывалась температурная нагрузка. Для моделирования пространства теплового поля вглубь образца создан макрос для ANSYS на параметрическом языке программирования APDL с учетом того, что тепловой поток распределяется по диаметру пятна нагрева по закону нормального распределения. В APDL-макросе для учета температурной нагрузки использована следующая зависимость [12]:

$$q = A q_H \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0-vt)^2}{r_H^2}\right],$$

где  $A$  — поглощательная способность материала, зависящая от свойств материала, состояния поверхности, температуры;  
 $q_H$  — плотность теплового потока на поверхности, Вт / м<sup>2</sup>;  
 $x, y$  — координаты центра пятна нагрева, м;  
 $x_0, y_0$  — начальные координаты центра пятна нагрева, м;  
 $r_H$  — радиус пятна нагрева, м.

Начальная температура принималась равной 20 °С, эффективная мощность источника варьировалась в диапазоне 0,5...2,5 кВт. Оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости модели образца, причем ось  $y$  направлена в сторону движения источника нагрева, ось  $z$  — по направлению действия источника тепла. На всех поверхностях детали задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи. Численный эксперимент проводился при следующих параметрах: диаметр пятна нагрева  $d = 1...4$  мм, скорость движения пятна  $v = 2...20$  мм / с.

В результате теоретических исследований динамической модели в широком диапазоне параметров были получены результаты решения задачи теплопроводности в виде линий уровня (изотерм), отражающих распределение температуры в образце. Некоторые результаты определения температурных полей при  $P = 1\ 000$  Вт приведены на рисунках 10, 11.

Из рисунка 10 видно, что даже при температурах ниже температур плавления материала при подходе пятна нагрева к краю образца температура резко возрастает, что приводит к оплавлению края образца (см. рисунок 3).

По результатам исследований установлено, что на глубине 0,6 мм температура снижается на 200...350 °С по сравнению с температурой на поверхности, на глубине 1 мм — на 450...600 °С в зависимости от режимов обработки.

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования свойств поверхностного слоя стали X12МФ после плазменного поверхностного упрочнения. Определена микротвердость образцов в зоне термического влияния, построены профилограммы, исследована топография поверхности после обработки с оплавлением и без оплавления, установлен характер распределения микротвердости по глубине. Глубина упрочненного слоя достигает 0,55...0,70 мм, ее значения в 2 раза выше значений микротвердости материала в исходном состоянии. Проведенные эксперименты показали, что подача азота позволяет значительно увеличить напряжение дуги и, соответственно, мощность плазмотрона и достичь плотности теплового потока в анодном пятне до  $6 \cdot 10^7$  Вт / м<sup>2</sup> при диаметре пятна до 2,4 мм.

По результатам проведенных исследований температурного поля и компьютерного моделирования процесса поверхностного упрочнения в ANSYS Workbench установлены оптимальные режимы поверхностного упрочнения образцов.

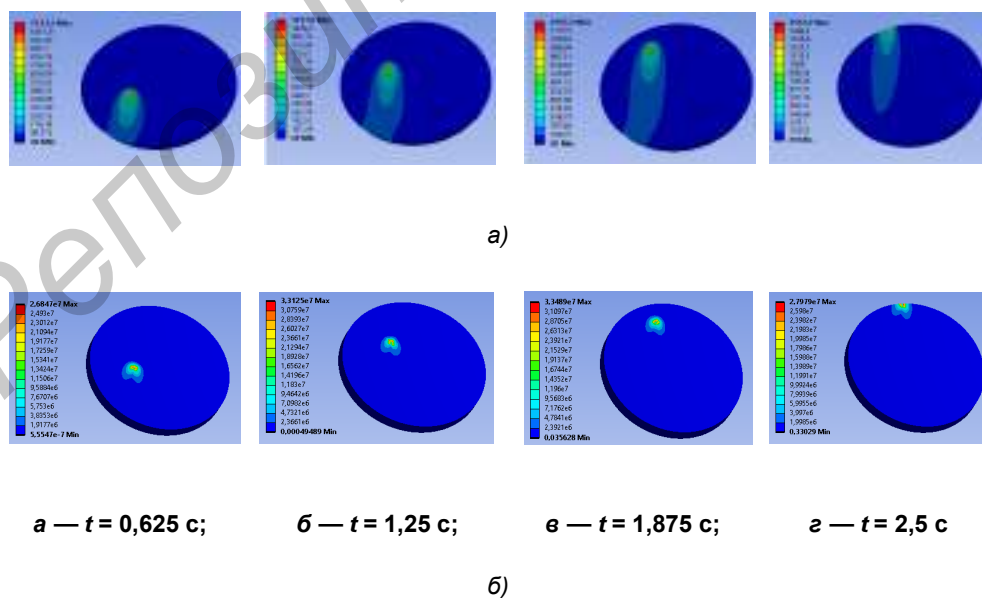


Рисунок 10. — Распределение полей температур (а) и суммарного теплового потока (б) на поверхности образца,  $V = 10$  мм / с,  $d = 2$  мм,  $q_H = 6 \cdot 10^7$  Вт / м<sup>2</sup>

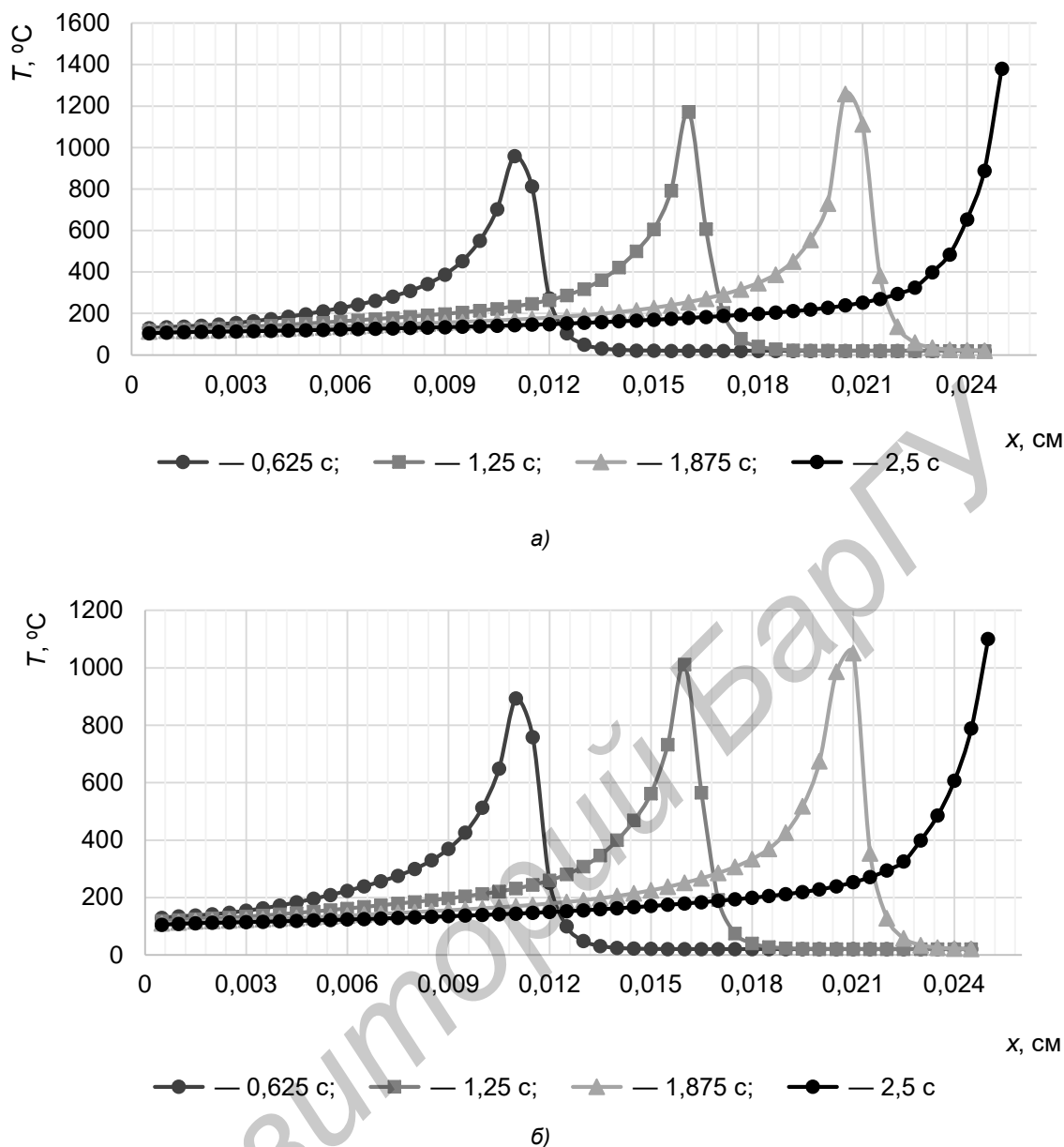


Рисунок 11. — Зависимость температуры от координаты для различных моментов времени по траектории движения центра пятна нагрева,  $V = 10$  мм / с,  $d = 2,5$  мм,  $q_H = 6 \cdot 10^7$  Вт / м<sup>2</sup> на поверхности (а) и глубине 0,5 мм (б)

#### Список цитируемых источников

1. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. — Киев : Наук. думка, 2008. — 215 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.] ; под общ. ред. Л. К. Лещинского. — Киев : Техніка, 1990. — 109 с.
3. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Белановский. — Иркутск : ИрГТУ, 2006. — 180 с.
4. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. — Гомель, 2008. — Вып. 2. — С. 6—12.
5. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2012. — № 4. — С. 28—31.

6. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels / M. Rezaayat [et al.] // *Metals*. — 2023. — No. 13. — 1268 p.
7. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening / Y. Xiang [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2015. — Vol. 226. — P. 238—246. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.22> (date of access: 19.09.2025).
8. Safonov, E. N. Plasma hardening hypereutectoid steel / E. N. Safonov, M. V. Mironova // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. — 2018. — 411. — 012069. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/411/1/012069>.
9. Поверхностное плазменное азотирование измельчителей древесных отходов / А. И. Веремейчик [и др.] // *Вестник БрГТУ*. — 2018. — № 4 (112). — С. 6—9.
10. Исследование механических свойств стали X12МФ после плазменного упрочнения / А. И. Веремейчик [и др.] // *Перспективные материалы и технологии : материалы междунар. симпозиума, г. Витебск, 25—29 авг. 2025 г. ; под ред. В. В. Рубаника*. — Минск : ИВЦ Минфина, 2025. — С. 239—241.
11. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. — 2023. — Т. 68, № 4. — С. 318—330.
12. Веремейчик, А. И. Моделирование температурного поля при лазерной закалке сталей / А. И. Веремейчик // *Современное машиностроение: наука и образование : материалы 14-й Междунар. науч. конф., 18 июня 2025 г. ; под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича*. — СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — С. 1033—1044.
13. Коротков, В. А. Поверхностная плазменная закалка / В. А. Коротков ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). — Н. Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2012. — 64 с.

Поступила в редакцию 03.10.2025.