Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 4. С. 197–208.
Aerospace MAI Journal, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 197-208. (In Russ.).

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 538.9
URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183600
EDN: https://www.elibrary.ru/QSDJAQ

Механизм избирательного воздействия лазерного импульса на трехмерные дефекты в поверхностном слое титанового сплава

Иван Сергеевич Сафронов[1]✉, Александр Иванович Ушаков[2]

[1, 2] Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
Москва, Российская Федерация
[2] Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ),
Москва, Российская Федерация
[1] issafronov@yandex.ru✉
[2] ushakov_a_i@mail.ru

Аннотация. Эксплуатационные свойства изделий авиационной техники, изготовленных из титановых сплавов, в значительной степени определяются свойствами поверхностного слоя. В статье рассматривается экспериментально установленный эффект одновременного повышения нанотвердости и стойкости к растрескиванию поверхности титанового сплава марки ВТ18у в результате селективного лазерного воздействия. Теоретически исследован механизм изменения состояния объемных дефектов в поверхностном слое твердого вещества в условиях ударного сжатия и кратковременного высокотемпературного прогрева под воздействием наносекундного лазерного импульса и лазерной плазмы. Проведено моделирование дефектной структуры, что позволило определить закономерности избирательного прогрева материала вблизи нанопор, а также влияние системы нанопор на специфику распространения изотерм. На основании полученных результатов предложена модель залечивания объемных дефектов, находящихся в поверхностном слое образца, периодическим кратковременным переводом поверхности материала в экстремальные условия. Экспериментальные исследования позволяют проверить соответствие теоретических предположений реальным данным. Полученные теоретические и экспериментальные результаты актуальны для физического материаловедения и расширяют представление о возможностях методов лазерной обработки металлических сплавов с объёмными дефектами, расположенными в тонком поверхностном слое. Основанный на исследуемом эффекте способ может найти применение на стадии финишной обработки поверхности титановых лопаток газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: селективный лазерный импульс, ударное сжатие, объемные дефекты, нанотвердость, залечивание дефектов

Для цитирования: : Сафронов И.С., Ушаков А.И. Механизм избирательного воздействия лазерного импульса на трехмерные дефекты в поверхностном слое титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 4. С. 197–208. URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183600

© Сафронов И.С., Ушаков А.И., 2024

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCE

Original article

Mechanism of Selective Laser Impulse Impact on Three-Dimensional Defects in the Titanium Alloy Surface Layer

Ivan S. Safronov[1]✉, Aleksandr I. Ushakov[2]
[1, 2] University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation
[2] Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI),
Moscow, Russian Federation
[1] issafronov@yandex.ru✉
[2] ushakov_a_i@mail.ru

Abstract
Structural materials employed in aviation engineering should be of high specific strength. Titanium alloys possess such properties, and performance properties of the parts made from these alloys are being largely determined by the the surface layer properties. One of the reasons for titanium alloys strength characteristics degradation is the presence of various defects in the surface layer.
One of the most up-to-date ways of a material mechanical characteristics control is the laser impulse selective effect on defective areas. The authors revealed the effect of simultaneous of nanohardness and cracking resistance increase of the VT18u titanium alloy surface. The said effect was being achieved by nanosecond laser impulse of 532 nm wavelength and a impulse energy of 75 mJ impact on the surface of the sample under study. While processing, laser radiation was focused on the surface of the sample with edges overlapping of the laser-treated areas. The nanopores state changing while selective laser processing is being analyzed by computer modeling. No mechanical stress concentrators present in an ideal pore shaped like a ball. The pore was considered vacuumed, which allowed assume its thermal conductivity equal to zero, as well as simplifying the pore healing process computation.
Heating specifics modeling of the titanium alloy surface layer, in which the system of pores of various sizes was placed, was performed. This approach allowed identifying some heating process regularities near nanopores with different sizes, as well as the effect of their configuration on the distribution of isotherms between the pores. Based on the obtained experimental results and the results of computer modeling, a mechanism for healing pores, located in the surface layer of the sample by the impulse short-time heating of the material surface and shock pressure was proposed. The article considers the main stages of the healing process of nanopores, located in the upper layer of the nanopore system. The metal alloy above the pore becomes more plastic and fills the pore under the action of the shock pressure. The article demonstrates that theoretical assumptions of the idealized model are consistent with experimental data. The changes in the micro- and nanopores state are being determined primarily by the laser impact conditions. Laser irradiation application allows healing selectively a part of the defects in the surface layer of the material, while the defect-free material does not change its structure and properties. Multiple impulse impact on the local segment of the defective material contributes to the proposed mechanism implementation in the deeper layers of the material. Physical process of simultaneous shock pressure and temperature impact can be employed at the stage of surface finishing of the parts. The obtained theoretical and experimental results are up-to-date for the physical materials science and expand the idea of possible laser processing methods for metal alloys with volumetric defects in a thin surface layer. This effect may find application at the stage of surface finishing of titanium parts.

Keywords: selective laser impulse, shock compression, volumetric defects, nano-hardness, healing of defects

For citation: Safronov I.S., Ushakov A.I. Mechanism of Selective Laser Impulse Impact on Three-Dimensional Defects in the Titanium Alloy Surface Layer. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 197–208. (In Russ.). URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=183600

Введение

Конструкционные материалы, используемые в авиационной технике, должны иметь высокую удельную прочность. Этим требованием отвечают сплавы на основе алюминия, магния и титана, которые находят широкое применение в авиационной технике. Эксплуатационные свойства деталей, изготовленных из этих сплавов, в значительной степени определяются свойствами поверхностного слоя и характеристиками находящихся в нем дефектов [1–3]. Исследование механизма селективного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения и лазерной плазмы на дефектные области в твердых материалах является перспективным направлением в области физического материаловедения [4–6]. Существуют материалы, интегральные физические свойства которых определяются состоянием отдельных областей, имеющих микро- и наноразмеры. Механическая целостность таких материалов определяется дефектными областями с размерами 10^{-10}–10^{-6} м.

Традиционные методы термомеханической обработки, в том числе с применением лазерных технологий, как правило, предусматривают воздействие на весь образец или его часть (например, поверхность) [7, 8], в результате которого меняются свойства и структура всего образца (или всего обрабатываемого участка поверхности) [9, 10]. Однако если физические свойства материала определяются нано- и микрообластями, то эффективная обработка предполагает избирательное воздействие на эти участки. По возможности локальное воздействие не должно влиять на свойства бездефектного материала.

Особенности селективного лазерного воздействия на оптически прозрачные материалы описаны в работе [5], где показано, что при определенных условиях лазерное излучение способно воздействовать преимущественно на дефектные области. Перевод дефектов в неопасное состояние описывается сложным механизмом, учитывающим разрушение поглощающих включений, релаксацию механических напряжений, частичное или полное залечивание микро- и наноразмерных пор и трещин. Бездефектный материал при таком воздействии не подвергается структурным изменениям и сохраняет свои свойства.

Для непрозрачных материалов селективное лазерное воздействие может быть реализовано в тонком поверхностном слое [11]. В результате избирательного воздействия короткоимпульсного лазерного излучения на дефектные области нанокристаллических металлических сплавов были обнаружены эффекты одновременного увеличения твердости и улучшения пластических характеристик. В работах [6, 11] отмечается существенный рост нано- и микротвердости, а также устойчивости поверхности материала к формированию трещин при интенсивном локальном нагружении алмазной пирамидкой. Локальный рост прочностных характеристик материала был качественно объяснен на основе представлений о возможности лазерного залечивания таких дефектов, как поры и микротрещины.

В данной статье экспериментальные исследования специфики изменения механических свойств поверхности материала при селективной лазерной обработке анализируются с применением методов моделирования воздействия лазерного прогрева и ударного сжатия на систему нанопор. В идеальной поре, имеющей форму шара, отсутствуют концентраторы механических напряжений, а теплообмен за счет излучения может реализовываться только высокоэнергетическими фотонами. Внутреннюю часть поры можно считать эвакуированной, что характеризуется околонулевой внутренней теплопроводностью. Таким образом, идеальная наноразмерная пора как физический объект обладает рядом уникальных физико-механических свойств.

Известно, что в поверхностном слое твердого материала всегда более высокая плотность дефектов [12, 13]. В случае аморфных металлов/сплавов это в первую очередь поры (плотность аморфных металлических сплавов всегда меньше из-за избыточного и структурно обусловленного свободного объема). Избыточную пористость могут иметь многие нанокристаллические материалы, получаемые при контролируемом отжиге аморфных многокомпонентных металлических сплавов [13, 14]. Плотность дефектов, в том числе нано- и микроразмерных пор, поверхности традиционных металлических сплавов также повышенная [15].

Ранее ряд авторов рассматривали процесс залечивания пор в твердых материалах, например, под действием повышенных температур и давлений [13, 16]. В этих условиях могут реализоваться такие механизмы залечивания пор, как вакансионный, дислокационный, вязкий массоперенос и пр. В работах [17, 18] проведено молекулярно-динамическое моделирование изменения пористости поверхностного слоя, инициированное ультракороткими лазерными импульсами. Авторы показали, что при определенных параметрах лазерного воздействия на материал возможно снижение пористости, которое сопровождается изменением структуры поверхности.

Однако в указанных выше работах изменение пористости (в том числе залечивание пор) рассматривается в рамках процессов, затрагивающих структуру и свойства всего материала. Изменение пористости вместе со структурой материала приводит к измене-

нию комплекса эксплуатационных свойств. Таким образом, в современной научной литературе процесс термомеханического воздействия на дефекты рассматривается в привязке к структуре и свойствам всего материала. Но особый интерес с точки зрения физики конденсированного состояния представляет изучение воздействия лазерного излучения на нано- и микропоры селективно. Селективное залечивание данных дефектов позволяет улучшить механические свойства материала без значительного изменения структуры и свойств бездефектных участков. Кроме того, представляет интерес исследование эффектов, локализованных вблизи «идеальных» наноразмерных пор в материале, находящемся в экстремальном состоянии.

2. Методика эксперимента

Исследования специфики изменения механических свойств материалов в результате воздействия лазерного импульса проводили на титановом сплаве марки ВТ18у. Поверхность титанового образца перед лазерной обработкой подвергалась шлифовке и полировке. Лазерная обработка осуществлялась с использованием полупроводникового лазера с основными техническими параметрами $\lambda = 532$ нм, $E = 75$ мДж, $\tau = 15–20$ нс, $\nu = 50$ Гц. Лазерное излучение фокусировалось над обрабатываемой поверхностью на высоте 1 мм, в результате чего получалась обработанная лазером зона с диаметром до 100 мкм. Плотность мощности излучения в области контакта с поверхностью материала лазерного импульса составляла 24 ГВт/м^2. Такая плотность мощности приводит к оптическому пробою в воздухе, она достаточна для формирования газоплазменного факела и ударной волны. В результате сверхбыстрого нагрева локальной области температура газоплазменного факела может превышать 3000 К, что могло вызывать дополнительное оплавление поверхности образца. Скорости нагрева и охлаждения в таких условиях могут достигать $10^{-6}–10^{-7}$ К/с. Общая температура образца в процессе лазерного облучения повышалась не более чем на 5–10 К.

Микрофотографии результата обработки поверхности получали с помощью инвертированного металлографического микроскопа Olympus BX51. Результаты измерения нанотвердости получены с использованием наноиндентора CSM TTX с трехгранной пирамидкой Берковича. Нанотвердость рассчитывалась автоматизированным комплексом по методу Оливера–Фарра с максимальной нагрузкой 0,05 Н [19, 20]. Микроразрушения и микротвердость образцов определяли с использованием установки ПМТ-3М.

Поверхность образцов обрабатывалась в несколько этапов:

Этап 1. Формировалась система видимых круглых областей, центры которых располагались на расстоянии друг от друга 150 ±5 мкм (рис. 1,*а*, цифрами обозначена последовательность облучения локальных областей).

Этап 2. Без наложения на предыдущие зоны обработки, осуществлялось смещение лазерного луча относительно последней зоны (правой нижней) на расстояние 100 мкм по диагонали (рис. 1,*б*).

Этапы 3 и 4. Эти два этапа формировали аналогичные матрицы, смещенные относительно предыдущих (рис. 1,*в* и *г*).

Общий размер полученной из наложенных друг на друга участков зон лазерной обработки области обработки составил 5 × 5 мм. Отметим, что в процессе экспериментального поиска диаметр зоны облучения мог быть как больше, так и меньше, однако общий алгоритм обработки оставался неизменным.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Экспериментальные результаты

Форма области обработки (возможного оплавления) представляет собой окружности диаметром 100 ±5 мкм (рис. 2). Области обработки предыдущих проходов практически неразличимы, их

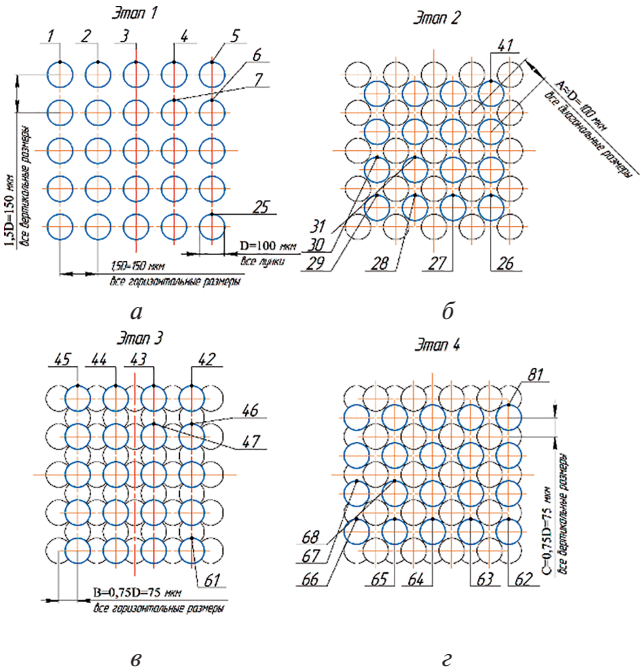
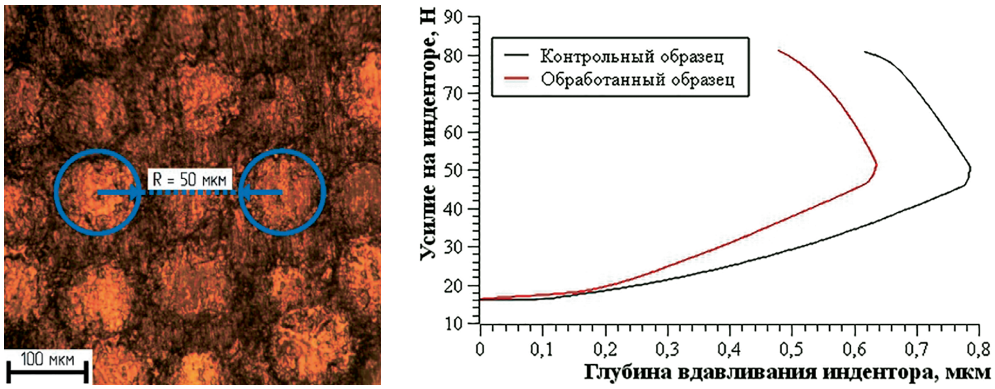


Рис. 1. Алгоритм формирования обработанных лазером участков на поверхности материала:
а – первый этап – создание матрицы неперекрывающихся обработанных участков;
б – второй этап – создание второй матрицы;
в – третий этап – создание третьей матрицы, частично перекрывающей первые две;
г – четвертый этап – завершение лазерной обработки поверхности



а *б*

Рис. 2. Характерный вид обработанной лазером поверхности и специфика изменения нанотвердости: *а* – округлые области лазерного оплавления с радиусом 100 мкм, две характерные области отмечены окружностями синего цвета; *б* – зависимость изменения глубины вдавливания наноиндентора от усилия

границы сильно искажены в результате наложения обработанных лазером областей друг на друга. На микрофотографии (рис. 2,*а*) синие окружности показывают границы зоны лунок после лазерного воздействия.

По методике Оливера–Фарра с помощью автоматизированного комплекса нанотвердомера получены экспериментальные данные, которые приведены в таблице.

В работах [6, 11, 21] отмечено повышение нанотвердости некоторых титановых сплавов после селективной лазерной обработки в четыре раза. Полученные в данной работе результаты показывают увеличение твердости материала в два раза, а модуля упругости – минимум в полтора раза. Увеличение модуля упругости позволяет предположить повышение пластичности материала и повышение сопротивления разрушению при значительном увеличении нагрузки на индентор, что является отличительной особенностью обсуждаемого метода лазерной обработки.

Была проведена дополнительная серия механических испытаний, в которых поверхность образца индентировали пирамидкой Виккерса (ПМТ-3М). Определяли статистику возникновения трещин в результате локального нагружения. Экспериментально определяли математическое ожидание вероятности формирования трещин на обработанной и необработанной поверхности при локальном нагружении пирамидкой Виккерса. Для каждой нагрузки было проведено по 20 испытаний, количество нагружений, при которых формировались трещины, делили на общее количество нагружений. Для необработанной поверхности титанового сплава математическое ожидание вероятности P формирования трещин при различных нагрузках на индентор (в ньютонах): $F = 0{,}49$, $P = 0{,}2$; $F = 0{,}98$, $P = 0{,}25$; $F = 1{,}47$, $P = 0{,}3$; $F = 1{,}96$, $P = 0{,}35$; $F = 2{,}94$, $P = 0{,}4$; $F = 3{,}92$, $P = 0{,}45$; $F = 4{,}9$, $P = 0{,}55$.

Для обработанного лазером титанового сплава математическое ожидание вероятности формирования трещин при $F \in [0{,}24\ \text{Н};\ 4{,}9\ \text{Н}]$ $P = 0$, т. е. не зафиксирован ни один случай формирования трещин.

Хрупкое разрушение необработанной поверхности исследованного титанового сплава может быть вызвано наличием дефектов, появившихся в результате традиционной термомеханической обработки. Высокие механические напряжения возле нано- и микроразмерных дефектов могут спровоцировать рост трещины. При селективной лазерной обработке возможна релаксация напряжений вокруг дефектов – зародышей разрушения, а также их дальнейшее залечивание

3.2. Теоретическая часть и обсуждение результатов

На текущем уровне развития научной экспериментальной техники не представляется возможным

Результаты обработки экспериментальных данных по методу Оливера–Фарра

Параметр	Исходный образец	Обработанный образец
EIT (модуль упругости) × 10^6, Па	103,9	176,84
HIT (нанотвердость) × 10^6, ГПа	4,3145	6,2168
HVIT (твердость по Виккерсу)	399,57	575,75

детально изучить процесс одновременного воздействия высоких температур и ударной волны на нанопоры и/или группу нанопор в режиме реального времени. Поэтому моделирование является эффективным инструментом исследования процесса прогрева и деформирования групп нанопор. В связи с особенностями взаимодействия лазерного излучения с твердыми телами моделирование проводили в два этапа. На первом этапе моделировали процесс прогрева поверхности материала без дефектов и поверхности материала, содержащего группу нанопор. Для понимания процессов деформирования изучали закономерности прогрева материала в окрестности нанопор и влияние геометрии такой системы на специфику распространения изотерм. Полученные результаты позволяли перейти ко второй части моделирования – исследованию процесса деформирования и залечивания нанопоры, находящейся в неоднородно прогретом материале с известным распределением изотерм.

Структурные изменения в титановом сплаве при моделировании температурного поля и шоковой ударной волны не учитывали. Это объясняется тем, что длительность воздействия импульса на поверхность составляет 20 нс, а скорость охлаждения титанового сплава составляет значение порядка 10^{-6}–10^{-7} К/с, фазовые изменения маловероятны или протекают в бесконечно малых объемах. Поэтому механические характеристики локальных обработанных лазером областей будут связаны с залечиванием объемных дефектов.

Моделировали воздействие единичного лазерного импульса. Титановый сплав является непрозрачным на длине волны лазерного излучения 532 нм, а воздействие лазерного импульса приводит к быстрому нагреву поверхности, абляции материала и формированию облака лазерной плазмы. Газоплазменное облако способно частично экранировать энергию лазерного излучения, при этом меняется характер нагрева материала. Таким образом, можно считать, что дальнейший нагрев материала обусловлен воздействием газоплазменного облака [6, 22, 23].

Оплавление материала не является обязательным фактором залечивания объемных дефектов, что учитывалось в процессе дальнейшего моделирования. Процесс селективного лазерного воздействия на поверхность материала может протекать по нескольким механизмам: 1) расплавления может не происходить; 2) возможен процесс абляции; 3) оплавление может быть следствием контакта лазерной плазмы с поверхностью. Кроме того, визуально различимый рельеф поверхности может формироваться под действием электрического поля поляризованного лазерного излучения [24]. В представленной работе основная роль в залечивании объемных дефектов отводится селективному ударно-тепловому воздействию лазерного излучения на объемные дефекты в титановом сплаве. Этот процесс может протекать при любом из вышепредставленных механизмов взаимодействия лазерного излучения с материалом. Температура границы нагрева задавалась с учетом процесса абляции, т. е. температуры плавления вещества.

Использовалась двумерная модель без учета внутренних источников тепла в условиях быстрого нагрева поверхности титанового сплава. Особенности распределения изотерм выявлялись при сравнении моделей бездефектного кристалла и блока (участка), содержащего систему пор. Расчетный блок взят в виде прямоугольника с размерами 45 × 2 мкм, на который накладывались граничные условия. Для учета абляции вещества с поверхности твердого материала в первые наносекунды облучения свободная граница образца, подвергающаяся начальному прогреву, задавалась в виде эллиптической лунки. Большая полуось эллиптической лунки задавалась размером $a = 10$ мкм, а глубина лунки (малая полуось эллипса) $b = 1$ мкм. Размеры области локального прогрева были уменьшены в пять раз для сокращения времени расчета. Такой подход не влиял на характер изотерм в связи с малостью размеров нанопор и размеров выбранной граничной области нагрева.

Наиболее значительное изменение механических свойств при селективной лазерной обработке наблюдается в поверхностном слое толщиной 0,5–1 мкм [6, 11, 21]. Соответственно, размеры пор и размеры системы пор выбраны таким образом, чтобы они находились в слое толщиной $\leqslant 1$ мкм. Конфигурация и размеры системы пор таковы, что за время прогрева реализуется максимальный градиент температур. Исходная температура блока – начальная температура среды – равна 293,15 К. Прогрев осуществляется со свободной поверхности лунки, начальная температура прогреваемой поверхности задается близкой к температуре плавления титана 1943 К, при этом на вертикальных границах, нижней границе и верхней границе вне лунки поддерживается исходная температура среды. В области воздействия лазерной плазмы использовали граничные условия первого рода. Так как избыточная температура не успевает распространиться на остальные поверхности образца, то граничные условия третьего рода вырождаются в граничные условия второго рода, которые и были использованы для этих поверхностей (за исключением узкой области между границей участка воздействия лазерной плазмы и свободной поверхностью).

Основное требование к физической модели селективной лазерной обработки заключается в

возможности лазерного излучения (и/или инициируемых им процессов) избирательно влиять на локальные неоднородные/дефектные области. Рассмотрим уравнение теплопроводности с точки зрения соответствия критериям селективной лазерной обработки [25, 26]. Теплообмен по механизму теплопроводности в твердом материале с внутренними источниками тепла описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c\rho\dot{T} = \nabla\left(k\nabla T\right) + Q, \qquad (1)$$

где T – температура, К;

$\dot{T} = \dfrac{\partial T}{\partial t}$ – производная температуры по времени t;

k – коэффициент удельной теплопроводности, Вт/(м · К);

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);

ρ – плотность, кг/м^3;

$\nabla = \dfrac{\partial}{\partial x} + \dfrac{\partial}{\partial y} + \dfrac{\partial}{\partial z}$ – оператор набла;

Q – тепловая мощность внутренних источников тепла, Дж/(с · м^3).

С учетом того, что при исследовании специфики прогрева использовали 2D-модель (также пренебрегаем внутренними источниками тепла, возникающими при деформировании материала вблизи пор под действием ударного сжатия), формула (1) принимает вид

$$c\rho T' = \frac{\partial\left(k\partial T\right)}{\partial x^2} + \frac{\partial\left(k\partial T\right)}{\partial y^2}, \qquad (2)$$

В данной работе анализировали распространение изотерм в идеальном образце (без дефектов) и распространение изотерм в образце с геометрией системы пор, показанной на рис. 3. При этом верхняя пора находится на расстоянии 100 нм от обрабатываемой поверхности.

В результате компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения FreeCAD и ElmerGUI установлено, что прогрев материала перед порой всегда происходит быстрее, чем в бездефектном материале. Одновременно прогрев материала под порой замедлен в сравнении с бездефектным материалом.

На рис. 4,*а* показана специфика распределения изотерм, а на рис. 4,*б* и *в* – закономерности снижения температуры по мере увеличения расстояния S

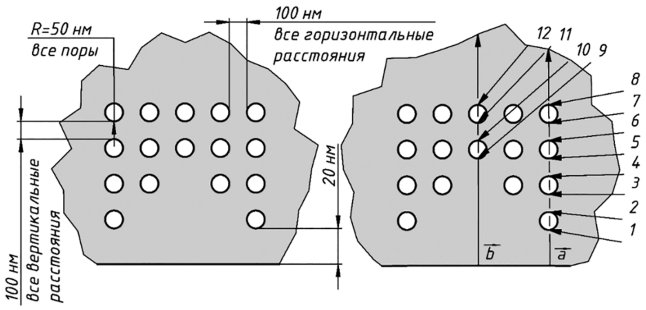
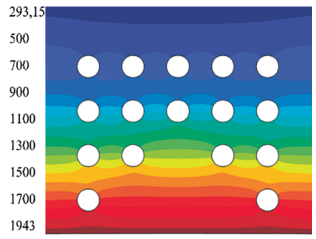
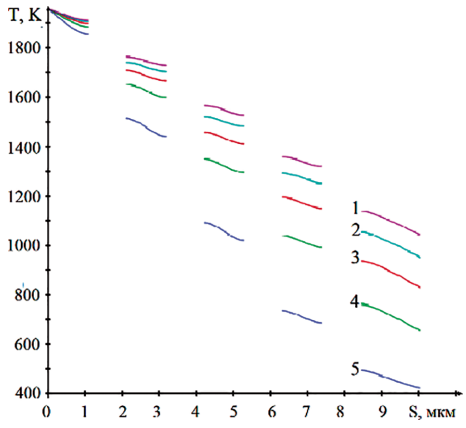


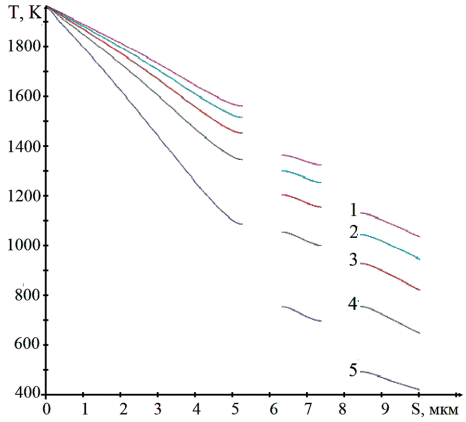
Рис. 3. Геометрия моделируемой системы нанопор (точки *1–12*). Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ показывают направление, вдоль которого анализируется изменение температуры



а



б



в

Рис. 4. Специфика распределения изотерм и характер изменения температуры в различных точках возле пор: *а* – общий вид распределения изотерм; *б* и *в* – изменения температуры на прямых, проходящих вдоль вектора $\vec{a}$ и вектора $\vec{b}$ (направление векторов указано на рис. 3); кривые *1* – 2 · 10^{-8} с; *2* – 4 · 10^{-8} с; *3* – 6 · 10^{-8} с; *4* – 8 · 10^{-8} с; *5* – 10^{-7} с

от поверхности образца вдоль векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Разрывам на графиках соответствуют поры. Разность температур между точками *1* и *2* может быть до ≈500 К на (начальных стадиях нагрева). В процессе моделирования проводился анализ распределения изотерм вдоль прямых проходящих вдоль векторов.

По результатам моделирования установлена зависимость разности температур в точках, расположенных над порами (это точки *1*, *3*, *5*, *7*, *9*, *11*) и под порами (это точки *2*, *4*, *6*, *8*, *10*, *12*). Для этого определяли численными методами температуру T_1 в материале в точке *1* и температуру T_2 в точке *2*, затем аналогичным образом температуру T_3 и T_4. Приращение температуры для каждой поры определяли по разности большего и меньшего значения: $\Delta T_1 = T_1 - T_2$; $\Delta T_2 = T_3 - T_4$. Аналогично рассчитывали приращение температур в данных точках для случая бездефектного материала: $\Delta T_{1бд} = T_{1бд} - T_{2бд}$; $\Delta T_{2бд} = T_{3бд} - T_{4бд}$ и т. д.

Особенности распределения изотерм возле поры оказывают значительное влияние на процесс залечивания под действием ударного сжатия. Например, в точках *1* и *9* температура существенно выше, чем в точках *2* и *10*. Импульсное лазерное облучение сопровождается формированием ударной волны с давлением до 10^{10} Па [11, 25, 26]. То есть создаются условия для движения нагретого материала в направлении распространения ударной волны. Эффективность данного процесса будет зависеть от длительности воздействия ударного сжатия, характеристик нагретого материала (реологические параметры сплошной среды) и ряда других факторов. Для всех объемных дефектов, показанных на рис. 3 и 4,*а*, распространение импульса сжатия направлено вертикально вверх (направление векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$). Как следствие, можно ожидать пластичного движения нагретого материала в направлении поры с последующим ее заполнением. С учетом предлагаемой модели (пора вакуумирована), возможно ее полное схлопывание с заполнением всего пространства легкоподвижными компонентами металлического сплава.

Проведено моделирование процесса схлопывания пор под действием ударной нагрузки с использованием QForm 10.2.4 и FreeCAD, с учетом распределения изотерм, показанных на рис. 4,*а*. В ходе моделирования процесса залечивания пор пренебрегали упругой деформацией (в связи с большими деформациями в окрестности поры). Задачу решали методом конечных элементов с использованием уравнения Леви–Мизеса, которое описывает связь между напряженным и деформированным состоянием (формула (3)) и уравнения связи между полем скоростей деформаций и полем скоростей материальных точек (формула (4)):

$$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} & \dot{\varepsilon}_{xy} & \dot{\varepsilon}_{xz} \\ \dot{\varepsilon}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} & \dot{\varepsilon}_{yz} \\ \dot{\varepsilon}_{zx} & \dot{\varepsilon}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{pmatrix} = \frac{3}{2}\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} \times \\ \times \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_{ср} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_{ср} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_{ср} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, 1/с; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ – эффективная скорость деформации, 1/с; $\bar{\sigma}$ – эффективное механическое напряжение, Па; σ – механическое напряжение, Па; τ – касательное механическое напряжение, Па; $\sigma_{ср}$ – среднее механическое напряжение, Па;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, 1/с; v – скорость деформирования, м/с.

Использовали критерий пластичности, в соответствии с которым определяли переход металла в пластическое состояние: $\bar{\sigma} = \sigma_s$, где σ – эффективное механическое напряжение (интенсивность нормальных напряжений), Па; σ_s – сопротивление материала пластическому деформированию.

В модели пору представляли в виде цилиндра, основание которого находится в плоскости, что позволило упростить задачу и использовать ранее полученное распределение температур (см. рис. 4), от которого зависят свойства материала. Свойства материала определялись реологической моделью материала (изменение сопротивления металла пластической деформации)

$$\sigma_s = \sigma_s\left(\varepsilon_{pe}, \dot{\bar{\varepsilon}}\right), \quad (5)$$

где ε_{pe} – эффективная пластическая деформация, 1/с; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ – эффективная скорость деформации, 1/с; T – температура, К.

Так как в процессе деформирования материала возле поры возможно локальное повышение температуры, то генерацию тепла в процессе пластической деформации определяли по уравнению

$$q_p = \beta_p \bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}, \quad (6)$$

где q_p – плотность теплового потока, обусловленного генерацией тепла в процессе пластической

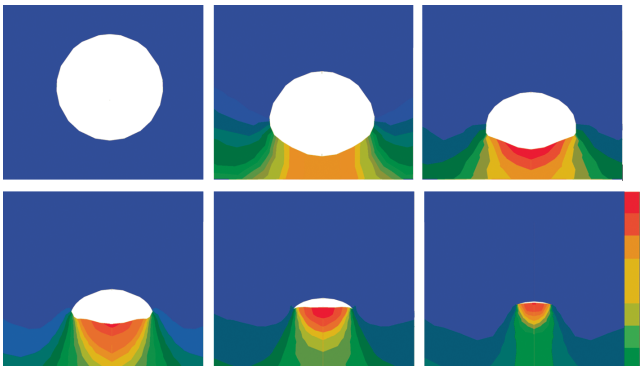


Рис. 5. Этапы заполнения поры, расположенной в неравномерно нагретом слое материала, под действием ударного сжатия. Цветной градиент показывает относительную скорость движения материала. Последовательность заполнения поры нагретым материалом выстроена слева направо

деформации, Вт/м^2; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ – эффективная скорость деформации, 1/с; $\bar{\sigma}$ – интенсивность механических напряжений, Па; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ – интенсивность скоростей деформаций; β_p – коэффициент преобразования работы деформации в тепло, 1/с.

В результате моделирования определены основные этапы залечивания исходной симметричной поры (рис. 5), для которой разница температур между верхней и нижней точкой составляет 150 K. Большая разница температур и определяет характер залечивания, при котором движение нагретого материала, расположенного над порой, преобладает над движением менее пластичного «холодного» материала под порой.

Кинетика предлагаемого процесса селективного лазерного залечивания пор заключается в следующем. Воздействие лазерного импульса на поверхность материала может вызывать как абляцию, так и формирование газоплазменного облака. Газообразное вещество в таком состоянии разогревает окружающее пространство. Если абляции или оптического пробоя не наблюдается, то поверхность материала нагревается непосредственно лазерным излучением. Разогрев может происходить до температур плавления или до предплавильных температур (в результате экранирования газовой фазой части энергии лазерного импульса). Одновременно в процессе разогрева поверхность подвергается ударному механическому воздействию со стороны газоплазменного облака или лазерному излучению. Такой процесс можно охарактеризовать как ударно-термическое воздействие на поверхностные слои образца, в которых могут быть расположены поры. Градиент температур и давления в верхней и нижней частях пор приводит к течению более пластичной (разогретой) части материала внутрь поры и дальнейшему ее схлопыванию.

Результаты моделирования непротиворечиво объясняют экспериментальные данные, а предложенная физическая модель лазерного воздействия на наноразмерные дефекты представляет интерес с точки зрения физики конденсированного состояния. Полученные результаты дополняют имеющиеся представления о влиянии на объемные дефекты ударного сжатия в условиях кратковременного воздействия высоких температур.

Выводы

1. В статье экспериментально и теоретически показана возможность лазерного упрочнения поверхности титановых сплавов. Рост нанотвердости обработанной лазером поверхности титанового сплава ВТ18у в 1,5–4 раза сопровождается увеличением ее стойкости к формированию трещин при нагружении алмазной пирамидкой Виккерса в результате залечивания объемных дефектов, часть которых являются концентраторами механических напряжений и зародышами разрушения.

2. Предложен механизм селективного залечивания объемных дефектов – идеальных пор, расположенных в поверхностном слое материала, – под действием наносекундных лазерных импульсов. Возможность селективного залечивания объемных дефектов уменьшается по мере удаления их от поверхности, что объясняется снижением как температуры материала в окрестности поры, так и ударной нагрузки.

3. Полученные теоретические и экспериментальные результаты актуальны для физического материаловедения и расширяют представление о возможностях методов лазерной обработки металлических сплавов с объемными дефектами, расположенными в тонком поверхностном слое. Предложенный способ лазерной обработки является перспективным с точки зрения возможностей улучшения комплекса механических свойств поверхности титановых сплавов.

Список источников

1. *Дмитриева М.О.*, *Мельников А.А.*, *Носова Е.А.* и др. Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
2. *Григорьев С.Н.*, *Волосова М.А.*, *Мигранов М.Ш.*, *Гусев А.С.* Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов // Вестник Московского

авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 188–195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195

3. *Брыкин В.А.*, *Рипецкий А.В.*, *Коробов К.С.* Исследование пористости, морфологии микроструктуры и механических характеристик изделий, полученных селективной лазерной плавкой порошка сплава AlSi10Mg // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 193–205. URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662
4. *Маркидонов А.В.*, *Старостенков М.Д.*, *Гостевская А.Н.* и др. Молекулярно-динамическое моделирование уменьшения пористости поверхностного слоя ОЦК-кристалла, вызванной воздействием лазерных импульсов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 2. С. 168–175. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.003
5. *Ушаков И.В.* Физика деформирования и разрушения кристалла исландского шпата при выделении энергии в объеме образца // Прикладная математика & Физика. 2024. Т. 56. № 3. С. 234–240. DOI: 10.52575/2687-0959-2024-56-3-234-240
6. *Ushakov I.V.*, *Safronov I.S.* Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 22. No. 2, pp. 77–81. DOI: 10.17580/cisisr.2021.02.14
7. *Chichenev N.A.*, *Gorbatyuk S.M.*, *Naumova M.G.*, *Morozova I.G.* Using the similarity theory for description of laser hardening processes // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 19. No. 1, pp. 44–47. DOI: 10.17580/cisisr.2020.01.09
8. *Петрова Л.Г., Белашова И.С.* Оценка твердорастворного упрочнения аустенитных сплавов при легировании азотом // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 245–252. DOI: 10.34759/vst-2022-1-245-252
9. *Kaputkina L.M.*, *Kaputkin D.E.* Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels // Materials Science Forum. 2003. Vol. 426-432, pp. 1119–1126. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119
10. *Швецов А.Н.*, *Скуратов Д.Л.* Влияние параметров процесса алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя деталей при производстве изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 220–231. URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177623
11. *Ushakov I.V.*, *Safronov I.S.*, *Oshorov A.D.* et al. Physics of the Effect of High-Temperature Pulse Heating On Defects in the Surface Layer of a Metal Alloy // Metallurgist. 2023. Vol. 67, pp. 74–79. DOI: 10.1007/s11015-023-01588-z
12. *Duan Xi.*, *Long T.*, *Zhu K.* et al. Formation mechanism of pore defects and surface ripples under different process parameters via laser powder bed fusion by numerical simulation and experimental verification // Research Square. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2844063/v1
13. *Betekhtin V.I.*, *Kadomtsev A.G.*, *Larionova T.V.* et al. Effect of Thermobaric Treatment on the Nanoporosity and Properties of Amorphous Alloys // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 56(9–10), pp. 555–558. DOI: 10.1007/s11041-015-9798-1
14. *Абросимова Г.Е.* Эволюция структуры аморфных сплавов // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 12. С. 1265–1281. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112b.1265
15. *Wang Z.*, *Ummethala R.*, *Singh N.* et al. Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys // Materials. 2020. Vol. 13. No. 20: 4564. DOI: 10.3390/ma13204564
16. *Betekhtin V.I.*, *Veselkov S.Yu.*, *Dal Yu.M.*, *Kadomtsev A.G.* Theoretical and experimental investigation of the effect of an applied load on pores in solids. Physics of the Solid State. 2003. Vol. 45. No. 4, pp. 649–655. DOI:10.1134/1.1569000
17. *Markidonov A.V.*, *Gostevskaya A.N.*, *Gromov V.E.* et al. Simulation of the Structural Changes in the Surface Layer of a Deformed BCC Crystal during a Short-Term External High-Intense Action // Russian Metallurgy (Metally). 2022. No. 10, pp. 1090–1095. DOI: 10.1134/S0036029522100305
18. *Markidonov A.V.*, *Starostenkov M.D.*, *Lubyanoi D.A.* et al. Modeling of Healing Cylindrical Cavities Exposed to Shock Waves in Crystal Subjected to Shear Deformation // Steel in Translationthis. 2022. Vol. 52. No. 2, pp. 208–214. DOI: 10.3103/S0967091222020127
19. *Мальцев П.П.* (ред.). Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника: мировые достижения за 2005 год: Сборник. – М.: Техносфера, 2006. – 149 с.
20. *Smallman R.E.*, *Ngan A.H.W.* Physical Metallurgy and Advanced Materials. 7th ed. Butterworth-Heinemann, 2011. – 672 p.
21. *Ushakov I.*, *Simonov Y.* Formation of surface properties of VT18u titanium alloy by laser pulse treatment // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5, pp. 2051–2055. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.072
22. *Wang H.-X.*, *Chen X.* Three-dimensional modelling of the laser-induced plasma plume characteristics in laser welding // Journal of Physics D: Applied Physics. 2003. Vol. 36. No. 6, pp. 628–639. DOI: 10.1088/0022-3727/36/6/304
23. *Дудоладов С.О.*, *Ларионов Н.В.* Условие применения интеграла Крокко при математическом описании плазменного факела при лазерной сварке // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 63–78. DOI: 10.18721/JPM.14305
24. *Gladkov S.O., Bogdanova S.B.* On the theory of nonlinear thermal conductivity // Technical Physics. 2016. Vol. 61. No. 2, pp. 157–164. DOI: 10.1134/S1063784216020110
25. *Cheilytko A.* Finding of the generalized equation of thermal conductivity for porous heatinsulating materials // Technological audit and production reserves. 2016. No. 5/1(31), pp. 4–10. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.78688

References

1. Dmitrieva MO, Mel'nikov AA, Nosova EA. et al. Studying the VT16 titanium alloy microstructure forming while compressor impeller manufacturing of the small-sized gas turbine engine by additive technologies methods. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):196-203. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
2. Grigor'ev SN, Volosova MA, Migranov MS. et al. Nano-structured wear-resistant coatings effectiveness at titanium alloys high-speed milling. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):188-195. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
3. Brykin VA, Ripetskii AV, Korobov KS. Studying Porosity, Structure Morphology and Mechanical Characteristics of the Products Obtained by Selective Laser Melting of the AlSi10Mg Alloy Powder. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):193-205. (In Russ.). URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662
4. Markidonov AV, Starostenkov MD, Gostevskaya AN. et al. Molecular dynamics simulation of a reduction in the porosity of the surface layer of a bcc crystal caused by the influence of laser pulses. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia* (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2023;20(2):168–175. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.003
5. Ushakov IV. Physics of Deformation and Destruction of Iceland Spar Crystal During the Release of Energy in the Sample Volume. *Applied Mathematics & Physics*. 2024;56(3):234–240. (In Russ.). DOI: 10.52575/2687-0959-2024-56-3-234-240
6. Ushakov IV, Safronov IS. Directed changing properties of amorphous and nanostructured metal alloys with help of nanosecond laser impulses. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;22(2):77–81. DOI: 10.17580/cisisr.2021.02.14
7. Chichenev NA, Gorbatyuk SM, Naumova MG. et al. Using the similarity theory for description of laser hardening processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2020;19(1):44–47. DOI: 10.17580/cisisr.2020.01.09
8. Petrova LG, Belashova IS. Assessment of solid-solution hardening of austenitic alloys at nitrogen alloying. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(1):245-252. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-1-245-252
9. Kaputkina LM, Kaputkin DE. Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels. *Materials Science Forum*. 2003;426-432:1119–1126. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119
10. Shvetsov AN, Skuratov DL. Diamond burnishing process parameters impact on the surface layer quality of the parts while aviation technology products manufacturing. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(4):220–231. (In Russ.). URL: https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177623
11. Ushakov IV, Safronov IS, Oshorov AD. et al. Physics of the Effect of High-Temperature Pulse Heating On Defects in the Surface Layer of a Metal Alloy. *Metallurgist*. 2023(67):74–79. DOI: 10.1007/s11015-023-01588-z
12. Duan Xi, Long T, Zhu K. et al. Formation mechanism of pore defects and surface ripples under different process parameters via laser powder bed fusion by numerical simulation and experimental verification. *Research Square*. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2844063/v1
13. Betekhtin VI, Kadomtsev AG, Larionova TV. et al. Effect of Thermobaric Treatment on the Nanoporosity and Properties of Amorphous Alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015;56(9-10):555–558. DOI: 10.1007/s11041-015-9798-1
14. Abrosimova GE. Evolution of the structure of amorphous alloys. *Physics-Uspekhi*. 2011;54(12):1227–1242. DOI: 10.3367/UFNe.0181.201112b.1265
15. Wang Z, Ummethala R, Singh N. et al. Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. *Materials*. 2020;13(20):4564. DOI: 10.3390/ma13204564
16. Betekhtin VI, Veselkov SYu, Dal YuM. et al. Theoretical and experimental investigation of the effect of an applied load on pores in solids. *Physics of the Solid State*. 2003;45(4):649–655. DOI:10.1134/1.1569000
17. Markidonov AV, Gostevskaya AN, Gromov VE. et al. Simulation of the Structural Changes in the Surface Layer of a Deformed BCC Crystal during a Short-Term External High-Intense Action. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022(10):1090–1095. DOI: 10.1134/S0036029522100305
18. Markidonov AV, Starostenkov MD, Lubyanoi DA. et al. Modeling of Healing Cylindrical Cavities Exposed to Shock Waves in Crystal Subjected to Shear Deformation. *Steel in Translationthis*. 2022;52(2):208–214. DOI: 10.3103/S0967091222020127
19. Mal'tsev PP. (ed) *Nanomaterialy. Nanotekhnologii. Nanosistemnaya tekhnika: mirovye dostizheniya za 2005 god: sbornik*. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 149 p. (In Russ.).
20. Smallman RE, Ngan AHW. *Physical Metallurgy and Advanced Materials*. 7th ed. Butterworth-Heinemann; 2011. 672 p.
21. Ushakov I, Simonov Y. Formation of surface properties of VT18u titanium alloy by laser pulse treatment. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):2051–2055. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.072
22. Wang H-X, Chen X. Three-dimensional modelling of the laser-induced plasma plume characteristics in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003;36(6):628–639. DOI: 10.1088/0022-3727/36/6/304
23. Dudoladov S, Larionov N. The condition for application of the crocco integral in the mathematical description of a laser welding plasma plume. *St Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2021;14(3):60–75. DOI: 10.18721/JPM.14305

24. Gladkov SO, Bogdanova SB. On the theory of nonlinear thermal conductivity // *Technical Physics*. 2016.Vol. 61. No. 2, pp. 157–164. DOI: 10.1134/S1063784216020110

25. Cheilytko A. Finding of the generalized equation of thermal conductivity for porous heatinsulating materials. Technological audit and production reserves. 2016;31(5/1):4–10. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.78688

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 19.11.2024.
The article was submitted on 07.10.2024; approved after reviewing on 18.11.2024; accepted for publication on 19.11.2024.

Редактор *Е.Л. Мочина*
Компьютерная верстка *В.В. Крючкова*

Сдано в набор 29.10.2024. Подписано в печать 25.12.2024.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 24,18. Уч.-изд. л. 26,00. Тираж 105 экз. Зак. 552/1325.
Цена договорная

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993