

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКЕ
ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ© 2019 г. Г. Ж. Сахвадзе^{1,*}, Р. З. Кавтарадзе², Т. М. Натришвили³, Г. Г. Сахвадзе^{1,4}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия*² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*³ *Институт механики машин им. Р. Двали, г. Тбилиси, Грузия*⁴ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия***e-mail: sakhvadze@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

В настоящей статье исследуются особенности терморелаксации сжимающих остаточных напряжений, сгенерированных при лазерно-ударно-волновой обработке, высоколегированной жаропрочной стали 37Х12Н8Г8МФБ. Проведено конечноэлементное моделирование процесса терморелаксации сгенерированных сжимающих остаточных напряжений. Получены закономерности влияния термических воздействий на характер перераспределения сжимающих остаточных напряжений в температурном диапазоне от 200 до 650°С. Сравнительный анализ показал, что полученные в результате конечноэлементного моделирования данные хорошо коррелируются с известными в литературе экспериментальными данными.

Ключевые слова: лазерно-ударно-волновая обработка, терморелаксация, остаточные напряжения, конечноэлементное моделирование

DOI: 10.1134/S0235711919050110

Введение. Все известные способы механической обработки поверхностей, такие как глубокая прокатка, лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО), дробеструйная обработка и др. оказывают положительное влияние в повышении качества обрабатываемых поверхностей [1]. Это достигается благодаря сгенерированным при этих процессах полям сжимающих остаточных напряжений (СОН), которые блокируют нежелательные процессы появления и распространения усталостных трещин, тем самым повышая их усталостные свойства. Для конструкций, которые во время эксплуатации испытывают воздействия повышенных механических и/или температурных нагрузок, эти полезные эффекты имеют настоящую ценность только в том случае, если сгенерированные приповерхностные СОН остаются стабильными и, если они не полностью релаксируют со временем. Известно, что по сравнению с традиционными способами упрочнения поверхностей, именно технология ЛУВО создает глубокие и термостабильные слои СОН для целого ряда материалов [2–7].

Высоколегированные жаропрочные стали 37Х12Н8Г8МФБ, исследуемые в настоящей статье, в основном используются в ответственных компонентах авиационных двигателей, которые работают в условиях высокой температуры и всегда подвержены циклическим нагрузкам. Обычно повреждения компонентов авиационных двигателей происходят из-за возникновения микротрещин на поверхности. Сжимающие оста-

Таблица 1. Физико-механические характеристики высоколегированной жаропрочной стали 37X12H8Г8МФБ

Характеристика	Значение	Размерность
Предел текучести	600	МПа
Предел прочности	1000	МПа
Модуль упругости	203	ГПа
Твердость по Бринеллю	269	МПа
Коэффициент температурного расширения	15.9×10^{-6}	1/град
Коэффициент теплопроводности	17.14	Вт/(м град)
Теплоемкость	440	Дж/(кг град)

точные напряжения, сгенерированные при ЛУВО, могут существенно улучшить усталостные характеристики металлических материалов, и они будут сопротивляться возникновению и распространению трещин. Однако эти СОН могут быстро релаксироваться при повышенных температурах. В литературе очень мало данных о влиянии ЛУВО на механические свойства стали 37X12H8Г8МФБ при повышенных температурах. Поэтому очень важно изучение термической стабильности СОН, возникающих в исследуемых материалах при обработке по технологии ЛУВО. В статье исследуется процесс терморелаксации СОН при повышенных температурах методом конечных элементов.

Исследуемый материал. С целью проведения сравнительного анализа и проверки адекватности разработанной численной модели расчета, конечноэлементным моделированием (КЭМ) было исследовано для материала, который использовался в экспериментах [8] – высоколегированной жаропрочной стали 37X12H8Г8МФБ (ее зарубежный аналог – Iron GH2036 alloy). Физико-механические характеристики стали приведены в табл. 1. Для моделирования технологии ЛУВО и процесса терморелаксации исследовался образец размером $(30 \times 30 \times 5)$ мм.

Схематизация технологии ЛУВО и возникновения СОН. Схематично общая методология технологии лазерно-ударно-волновой обработки и возникновения СОН показана на рис. 1.

Обрабатываемая поверхность (рис. 1а, позиция 5) покрывается непрозрачным для лазерного излучения слоем с низкой температурой испарения: черной краской, металлической фольгой или лентой 3. Сверху находится прозрачный слой 2, роль которого наиболее часто выполняет вода или стекло. Энергия лазерного импульса I поглощается непрозрачным слоем, что приводит к его нагреву, испарению и формированию высокотемпературной плазмы, ограниченной с одной стороны поверхностью исследуемого материала, а с другой – прозрачным слоем, сдерживающим распространение плазмы. Вследствие ограниченности объема, давление резко возрастает до высоких значений и быстро распространяется в материал в виде ударной волны 4, которая способствует появлению в материале сжимающих остаточных напряжений. Если эти напряжения превосходят упругий предел Гюгонио, то материал деформируется пластически [2]. Более подробно протекающие при ЛУВО физико-механические процессы описаны в [4].

Схематизация численного моделирования. Предложенная в настоящей статье стратегия конечноэлементного моделирования определения терморелаксации СОН, сгенерированных при ЛУВО, состоит из трех шагов (рис. 2).

Область КЭМ обведена пунктирными линиями: 1) вычисление собственных деформаций, вызванных с применением технологии ЛУВО путем решения явной задачи динамического анализа посредством пакета LS-DYNA; 2) далее решается неявная за-

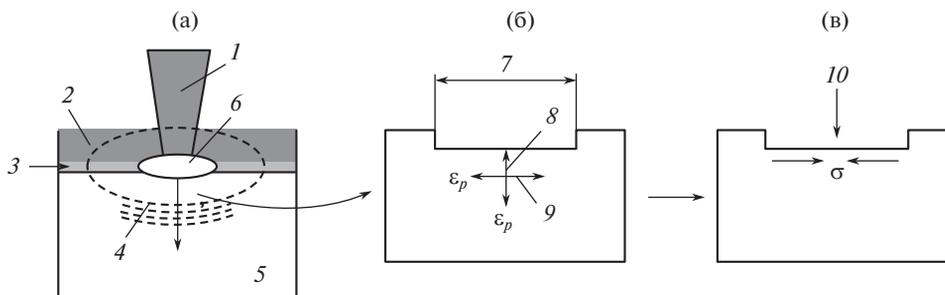


Рис. 1. Принципиальная схема технологии ЛУВО (а), схемы возникновения пластических деформаций в приповерхностной зоне во время ЛУВО (б) и ОН после ЛУВО (в): 1 – лазерный импульс; 2 и 3 – прозрачный и непрозрачный слой; 4 – ударная волна; 5 – исследуемый материал; 6 – плазма; 7 – зона воздействия лазерного импульса; 8 и 9 – сжимающие и растягивающие пластические деформации; 10 – релаксация деформируемого материала и возникновение СОН.



Рис. 2. Схема моделирования технологии ЛУВО и определения терморелаксации остаточных напряжений.

дача ANSYS, где полученные на шаге 1 собственные деформации вводятся в качестве входных данных, и выполняется решение задачи для определения полных СОН, вызванных технологией ЛУВО; 3) полученные на шаге 2 СОН являются входными данными для решения неявной сопряженной термомеханической задачи в ANSYS, где добавляется термонагружение по поверхности исследуемого материала и вычисляется терморелаксация СОН.

Таблица 2. Константы для модели Джонсона–Кука для высоколегированной жаропрочной стали 37X12H8Г8МФБ

Константа	Значение	Размерность
A	900	МПа
B	1200	МПа
C	0.0092	–
n	0.6	–
m	1.27	–

Заметим, что при моделировании процессов ЛУВО возникают большие вычислительные затраты. Чтобы существенно уменьшить их, используют известный метод собственных деформаций [9]. Более подробно особенности численного моделирования, дискретизации по сетке и по времени приведены в [10].

Определяющее соотношение. При ЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают величин 10^6 с^{-1} и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния в качестве определяющего соотношения используется модель пластического деформирования материала Джонсона–Кука [11]

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^*)[1 - (T^*)^m], \quad (1)$$

где σ – эквивалентное напряжение по Мизесу, $\bar{\epsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\bar{\epsilon}}^* = \dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0$ – безразмерная эквивалентная скорость деформации ($\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$), T^* – гомологическая температура, связь которой с абсолютной температурой T определяется следующим образом

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0),$$

где T_0 – комнатная температура, T_m – температура плавления материала образца.

Уравнение (1) содержит пять материальных констант, которые определяются эмпирическим путем: A – статический предел текучести, B – модуль деформационного упрочнения, n – показатель степени в законе деформационного упрочнения, C – коэффициент скорости деформаций, m – показатель степени в законе температурного разупрочнения. Материальные константы для высоколегированной жаропрочной стали 37X12H8Г8МФБ приведены в табл. 2 [12]. Заметим, что модель Джонсона–Кука в аналогичных задачах апробирована и дает удовлетворительные результаты [13–19].

Анализ терморелаксации остаточных напряжений. Рассмотрим эффект влияния термообработки (температуры и времени отжига) на терморелаксацию созданных при ЛУВО полей СОН. На микроуровне процесс терморелаксации в материале осуществляется термически активными процессами, которые аналитически успешно описываются моделью Зинера–Верта–Аврами с помощью уравнения (2) [8]

$$\frac{\sigma_{res}}{\sigma_0} = \exp[-(At_a)^m], \quad (2)$$

где σ_0^{res} являются начальными СОН до отжига, σ^{res} – остаточные напряжения при заданном времени отжига t_a и при заданной температуре отжига T_a ; m – численный параметр, в основном зависящий от доминирующего механизма релаксации; A – это функция, зависящая от свойств материала и температуры, которую можно определить следующим образом [8]

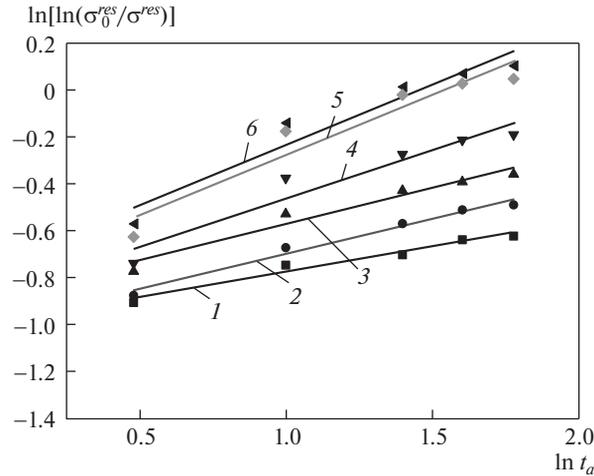


Рис. 3. Влияние времени отжига t_a на терморелаксацию СОН при разных температурах отжига T_a : 1 – $T_a = 200^\circ\text{C}$; 2 – $T_a = 300^\circ\text{C}$; 3 – $T_a = 400^\circ\text{C}$; 4 – $T_a = 500^\circ\text{C}$; 5 – $T_a = 600^\circ\text{C}$; 6 – $T_a = 650^\circ\text{C}$.

$$A = B \exp\left(-\frac{\Delta H}{kT_a}\right), \quad (3)$$

где B – постоянная величина для данного материала (для исследуемого нами материала она равна $2.05 \times 10^{12} \text{ мин}^{-1}$ [8]); k – постоянная Больцмана (для исследуемого материала она равна $8.617343 \times 10^{-5} \text{ эВ/К}$ [8]); ΔH – энтальпия активации материала при релаксации; T_a – температура отжига.

Для анализа уравнение (2) удобнее представить в виде

$$\ln \left[\ln \left(\frac{\sigma_0^{res}}{\sigma^{res}} \right) \right] = m \ln A + m \ln t_a. \quad (4)$$

На рис. 3 в качестве примера показан график зависимости $\ln[\ln(\sigma_0^{res}/\sigma^{res})]$ от $\ln t_a$ при заданной температуре отжига T_a .

Эта зависимость почти линейная, при этом угол наклона линии численно равен m_i [8]. За истинным значением m берется среднее значение наклонов всех линий. После этого из формулы (3) легко можно определить энтальпию активации процесса релаксации ΔH . Согласно полученным данным, значения m равны 0.22, 0.31, 0.311, 0.412, 0.512 и 0.513 при температурах 200°C , 300°C , 400°C , 500°C , 600°C и 650°C , соответственно. Таким образом среднее значение m составляет 0.38, а значение ΔH составляет около 1.88 эВ. Зная m и ΔH , из уравнения (3) можно определить, например, время отжига t_a , при котором достигается заданный уровень СОН (σ^{res}).

Полученные результаты и их анализ. На рис. 4 показаны распределения поверхностных и приповерхностных СОН при разных температурах отжига T_a . Максимальные СОН наблюдаются в поверхностном слое, которые составляют около 510 МПа. Глубина упрочненного слоя со значительными СОН составляет примерно 0.62 мм. Исследования показывают, что СОН уменьшаются по мере удаления от поверхности. Кроме того, на определенной глубине (это – примерно 0.58 мм) появляются нежелательные растягивавшие остаточные напряжения (РОН).

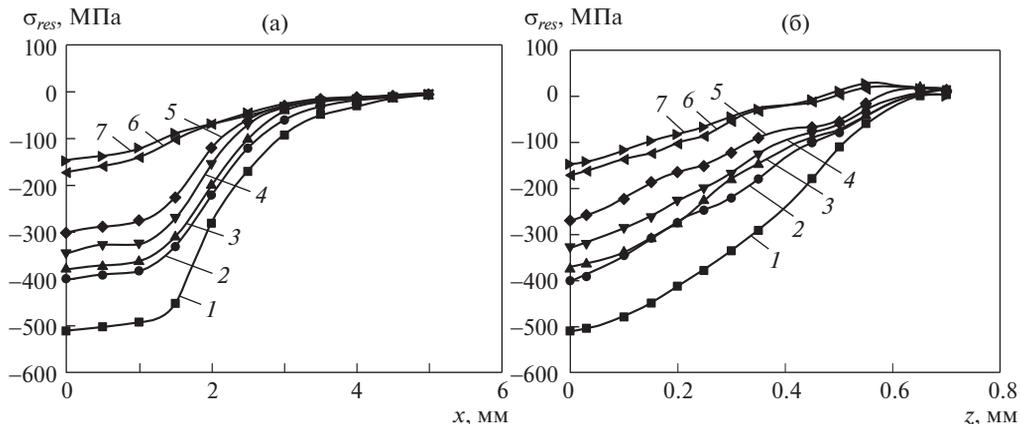


Рис. 4. Распределения СОН при разных температурах отжига T_a : (а) по поверхности (по оси x); (б) в приповерхностной области (по глубине – по оси z): 1 – после ЛУВО (начальное распределение СОН – до приложения термической нагрузки); 2 – $T_a = 200^\circ\text{C}$; 3 – $T_a = 300^\circ\text{C}$; 4 – $T_a = 400^\circ\text{C}$; 5 – $T_a = 500^\circ\text{C}$; 6 – $T_a = 600^\circ\text{C}$; 7 – $T_a = 650^\circ\text{C}$.

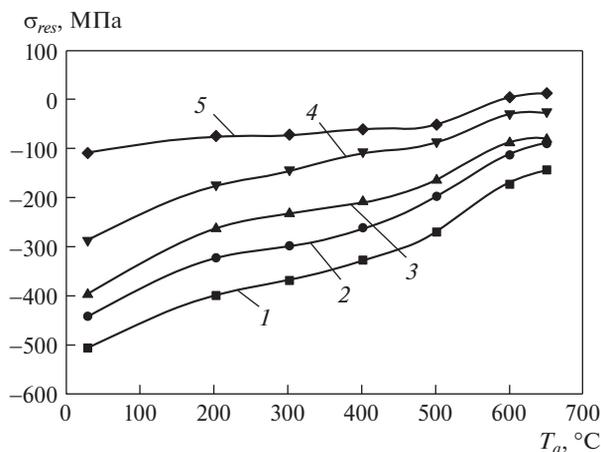


Рис. 5. Характер распределения СОН в зависимости от температуры отжига T_a на поверхности и в приповерхностной области: 1 – на поверхности; 2 – на глубине 0.1 мм; 3 – на глубине 0.2 мм; 4 – на глубине 0.35 мм; 5 – на глубине 0.5 мм.

Из количественного и качественного анализа данных, приведенных на рис. 5 следует, что релаксация СОН активно происходит при различных температурах в диапазоне от 200 до 650°C. Можно сделать важное заключение: они полностью не обнуляются даже при температуре 650°C. Максимальные СОН уменьшаются с 510 МПа (сразу после ЛУВО, до приложения термической нагрузки) до 401 МПа (при температуре отжига 200°C); до 370 МПа (при температуре 300°C); до 330 МПа (при температуре 400°C); до 270 МПа (при температуре 500°C); до 170 МПа (при температуре 600°C) и до 145 МПа (при температуре 950°C). Время отжига в нашем случае – всюду 60 мин. Эти

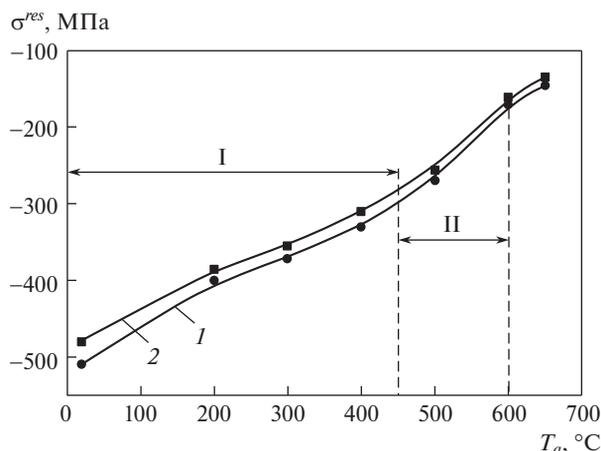


Рис. 6. Влияние температуры отжига T_a (при времени отжига 60 мин) на характер распределения сжимающих остаточных напряжений σ^{res} , сгенерированных технологией ЛУВО: 1 – результаты конечноэлементного моделирования, 2 – экспериментальные результаты из [8], I – зона плавного изменения СОН, II – зона резкого изменения СОН.

уменьшения СОН в процентах составляют 21.4%, 27.5%, 35.3%, 47.2%, 66.6% и 71.5%, соответственно.

Таким образом, можно заключить, что СОН значительно уменьшаются с ростом температуры отжига. Это означает, что влияние температуры на процесс терморелаксации СОН является главенствующим фактором. Также видим, что при повышении температуры от 200 до 650°C максимальная терморелаксация СОН происходит в приповерхностном слое, в глубинных же слоях они также уменьшаются, но менее интенсивно. При этом характер распределения остаточных напряжений после терморелаксации становится более равномерным.

Таким образом, разработанную конечноэлементную модель можно успешно использовать при численном анализе терморелаксации СОН, созданных при использовании технологии ЛУВО, что очень важно при анализе ответственных компонентов машин, работающих при повышенных температурах. Упрочняющий эффект от технологии ЛУВО и повышение усталостной долговечности материалов, работающих при повышенных температурах, становится все более актуальной для критически важных объектов, работающих в околоэкстремальных состояниях эксплуатации.

На рис. 5 показано влияние температуры отжига на характер перераспределения поверхностных и приповерхностных СОН, вызванных ЛУВО. Видно, что остаточные напряжения постепенно релаксируют с увеличением температуры отжига, и на определенной глубине (примерно 0.5 мм) становятся почти нулевыми.

Что касается учета фактора времени, можно сделать вывод, что СОН релаксируют в основном в течение первых 30 минут термообработки. Далее они имеют тенденцию стабилизироваться и терморелаксация практически прекращается.

Сравнительный анализ. Проверка адекватности разработанной численной модели

На рис. 6 показаны экспериментальные (кривая 2, взятая из [8]) и расчетные (кривая 1) зависимости распределения сжимающего остаточного напряжения от температуры отжига T_a при заданной величине времени отжига t_a (в нашем случае $t_a = 60$ мин). Как видно (кривая 1) СОН плавно меняются с повышением температуры от 200 до

450°С (зона I), при этом наклон кривой ($\sigma^{res} - T_a$) значительно увеличивается после 450°С, но после 600°С снова становятся гладким, что указывает на тот факт, что температура отжига в интервале от 450°С до 600°С (зона II) оказывает сильное влияние на процесс терморелаксации СОН исследуемого материала по сравнению с более низкой или более высокой температурами. Проведенные исследования показывают, что предел текучести уменьшается более заметно с повышением температуры именно в диапазоне от 450 до 600°С, т.е. процесс терморелаксации СОН в этом температурном интервале протекает более интенсивно по сравнению с другими интервалами. Сравнение с экспериментальными данными дает удовлетворительные результаты. Отсюда можно сделать вывод о том, что эффект влияния температуры и времени отжига на терморелаксацию СОН, сгенерированных технологией ЛУВО, может быть удовлетворительно описан с использованием модели Зинера–Верта–Аврами, использованного в нашем КЭМ.

В настоящей статье рассматривались особенности терморелаксации СОН в зависимости от температуры и времени отжига. Известно, что процесс терморелаксации СОН существенно зависит и от конкретных механизмов терморелаксации, которых несколько.

Выводы. Технология лазерно-ударно-волновой обработки имеет уникальные преимущества в задаче улучшения механических свойств и усталостных характеристик материалов за счет создания сильных полей сжимающих остаточных напряжений в приповерхностной области. В статье описано исследование влияния термической обработки (в условиях изотермического отжига) на терморелаксацию сжимающих остаточных напряжений для высоколегированной жаропрочной стали 37X12H8Г8МФБ в температурном диапазоне от 200 до 650°С на основе имитационного конечноэлементного моделирования.

Показано, что на степень терморелаксации существенно влияют температура и время отжига, в частности, она увеличивается при увеличении температуры в диапазоне от 200 до 650°С. При этом установлено, что поверхностные сжимающие остаточные напряжения релаксируют быстрее, чем подповерхностные. Кроме того, максимальная релаксация СОН происходит на глубинах максимальных СОН, а более низкие начальные остаточные напряжения релаксируют медленнее. Также установлено, что с повышением температуры отжига скорость терморелаксации увеличивается, но она уменьшается с увеличением времени отжига. Важным результатом является и тот установленный факт, что характер распределения остаточных напряжений после терморелаксации становится более равномерным.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность к.т.н. Власову Н.А. за помощь в проведении расчетов в конечноэлементных пакетах LS-DYNA и ANSYS.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0166 от 26.09.2017 г., проект RFMEFI60717X0166.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikitin I., Besel M. Residual stress relaxation of deep-rolled austenitic steel // *Scr. Mater.* 2008. № 58. P. 239.
2. Peyre P., Fabbro R., Merrien P. Laser shock processing of aluminium alloys // *Application to high cycle fatigue behavior. Mater Sci. Eng.* 1996. № 210. P. 102.
3. Torres M., Voorwald H. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel // *Int. J. Fatigue.* 2002. № 24. P. 877.
4. Kwofie S. Description and simulation of cyclic stress–strain response during residual stress relaxation under cyclic load // *Procedia Eng.* 2011. № 10. P. 293.
5. Xu S., Huang S., Meng X., Sheng J., Zhang H., Zhou J. Thermal evolution of residual stress in IN718 alloy subjected to laser peening // *Optics and Lasers in Engineering.* 2017. № 94. P. 70.
6. Nikitin I., Scholtes B., Maier H.J. High temperature fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic steel AISI 304 // *Scr. Mater.* 2004. № 50. P. 1345.
7. Nalla P., Altenberger I., Noster U. On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti–6Al–4V at ambient and elevated temperatures // *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. № 355. P. 216.
8. Ren X.D., Zhou W.F., Ren Y.P., Xu S.D., Liu F.F., Yuan S.Q., Ren N.F., Huang J.J. Dislocation evolution and properties enhancement of GH2036 by laser shock processing: Dislocation dynamics simulation and experiment // *Materials Science & Engineering A.* 2016. V. 654. P. 184.
9. Korsunsky A.M. Residual elastic strain due to laser shock peening: modelling by eigenstrain distribution // *J. Strain Anal. Eng. Des.* 2006. V. 41 (3). P. 195.
10. Zhong Z., Sagar B., Gokul R. Thermal relaxation of residual stress in laser shock peened Ti–6Al–4V alloy // *Surf. Coat Technol.* 2012. № 206. P. 4619.
11. Zhong Z., Amrinder S.G., Dong Q. A finite element study of thermal relaxation of residual stress in laser shock peened IN718 superalloy // *Int. J. Impact Eng.* 2011. № 38. P. 590.
12. Liao Y.L., Suslov S., Ye C. The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance // *Acta Mater.* 2012. № 60. P. 4997.
13. Сахвадзе Г.Ж. Особенности конечноэлементного моделирования остаточных напряжений, возникающих в материале при лазерно-ударно-волновой обработке, с использованием метода собственных деформаций // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 4. С. 87.
14. Сахвадзе Г.Ж. Конечноэлементное моделирование технологии многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов с использованием метода собственных деформаций // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 5. С. 91.
15. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В., Бармина О.В., Киквидзе О.Г. Повышение микротвердости материалов технологией двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки // *Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал* № 7(107). 2016. С. 29. <http://www.vn-tr.ru/nomera/2016-7107/>
16. Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г. Технология двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки материалов // *Вестник машиностроения.* 2016. № 10. С. 71.
17. Сахвадзе Г.Ж., Кавтарадзе П.З., Никабадзе М.У. Использование метода собственных деформаций при моделировании технологий однократной и многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов // *Вестник машиностроения.* 2018. № 7. С. 41.
18. Sakhvadze G., Shokhin A., Kikvidze O. Residual Stresses distribution in Ti–6Al–4V titanium alloys during Laser Shock Processing // *Vibroengineering PROCEDIA*, October 2016. V. 8. P. 422.
19. Vlastimir N., Miloš M., Dalibor P., Dejan J., Milan S. Parameters forecasting of laser welding by the artificial intelligence techniques // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering.* 2018. V. 16. № 2. P. 193. <https://doi.org/10.22190/FUME180526025N>