

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ
ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ

© 2021 г. Г. Ж. Сахвадзе

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: sakhvadze@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.02.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Методами анализа размерностей и конечно-элементного моделирования исследованы процессы, протекающие при лазерно-ударно-волновой обработке титановых сплавов с эффектом памяти формы. Установлено, что основными безразмерными параметрами, управляющими распределением остаточных напряжений и глубиной пластической зоны, возникающих при лазерно-ударно-волновой обработке, являются безразмерные длительность действия лазерного импульса и пиковое давление в ударной волне. На основе принятого определяющего соотношения, учитывающего мартенситное превращение, было численно исследовано влияние указанных безразмерных параметров на возникающие при лазерно-ударно-волновой обработке остаточные напряжения в сплавах с эффектом памяти формы. Получены численные результаты, количественно раскрывающие закономерности влияния вышеуказанных безразмерных параметров на остаточные напряжения. Полученная численным моделированием связь между глубиной пластической зоны и пиковым давлением в ударной волне подтверждена сравнением с аналогичными экспериментальными результатами, известными из литературы.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, лазерно-ударно-волновая обработка, безразмерные параметры, анализ размерностей, остаточные напряжения, глубина пластической зоны, пиковое давление в ударной волне

DOI: 10.31857/S0235711921040131

Сплавы с эффектом памяти формы (СПФ) являются одними из самых популярных материалов, которые все чаще и чаще используются в качестве потенциально лучших материалов для биомедицинских устройств и различных конструкционных применений. Их уникальные свойства, такие как память формы и сверхупругие эффекты, получаются в результате термоупругого мартенситного превращения между высокотемпературной высокосимметричной аустенитной фазой и низкотемпературной низкосимметричной мартенситной фазой [1]. Для возникновения деформационно-индуцированного мартенсита и повышения его стабильности в сплавах NiTi (Ni – 50.9%, Ti – 49.1%, далее – NiTi) с эффектом памяти формы ранее было использовано несколько методов интенсивной пластической деформации, такие как дробеструйная обработка, холодная прокатка, кручение под высоким давлением и равноканальное угловое прессование [2]. Недавно сообщалось о деформационно-индуцированном мартенсите, генерируемом при лазерно-ударно-волновой обработке (ЛУВО) в сплавах NiTi [3]. Таким образом, помимо прочего, это делает ЛУВО еще одной перспективной технологией, обладающей большим потенциалом для обработки СПФ и создания в

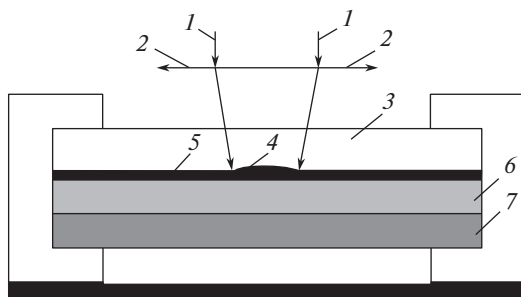


Рис. 1. Принципиальная схема технологии ЛУВО. 1 – лазерный импульс; 2 – фокусирующая линза; 3 – прозрачный слой; 4 – плазма; 5 – поглощающий слой; 6 – исследуемый образец; 7 – подложка.

них локализованных деформационно-индуцированных мартенситных структур для конкретных практических применений.

ЛУВО – это инновационный метод улучшения качества поверхностей металлических конструкции, который широко применяется в аэрокосмической и автомобильной промышленности для улучшения механических свойств ключевых компонентов машин [4]. Во время ЛУВО (рис. 1) лазерный импульс с высокой плотностью мощности излучения 1 через линзы 2 фокусируется на поглощающий слой 5 (обычно – черная краска), предварительно нанесенного на металлическую поверхность исследуемого образца 6, проходя через прозрачный ограничивающий слой 3 (обычно – вода или стекло). Нагретая поверхность мгновенно испаряется, и посредством ионизации превращается в плазму 4. Плазма зажата между прозрачным ограничивающим слоем и исследуемым образцом, продолжая поглощение лазерной энергии. При этом плазмой генерируется высокое давление, которое передается исследуемому материалу в виде ударных волн. Обычно сгенерированное давление плазмы может достигать нескольких ГПа за десятки наносекунд. При распространении ударной волны в приповерхностном слое исследуемого материала происходит пластическая деформация, что приводит к возникновению и определенному перераспределению остаточных напряжений по всей глубине пластической зоны. Для традиционных металлических материалов, таких как разные алюминиевые сплавы, титановые сплавы и нержавеющие стали, были проведены обширные экспериментальные исследования по ЛУВО, в которых изучалось влияние таких параметров, как форма и размеры лазерного пятна, интенсивность лазерного излучения, на возникающие при ЛУВО остаточные напряжения [5]. Также были разработаны аналитические и численные модели, основанные на описании физических процессов, протекающих при ЛУВО, и они успешно прогнозировали распределения остаточных напряжений и глубины пластических зон в зависимости от параметров лазерного воздействия [6]. Однако применение ЛУВО для сплавов с памятью формы слабо изучено как экспериментально, так и аналитически.

Для СПФ большое практическое значение имеет установление оптимальных параметров воздействия при ЛУВО и соответствующие им степени упрочнения материалов. Однако возникают определенные сложности при проведении таких экспериментов [7]. Также трудно определить оптимальные параметры обработки с помощью теоретического анализа, поскольку ЛУВО – это сложный физико-механический процесс, на который влияет множество параметров, таких как параметры лазера, параметры окружающей среды и параметры материала. В настоящей статье с помощью методов анализа размерностей и конечно-элементного моделирования представлены результаты исследования ЛУВО применительно к сплавам СПФ (NiTi).

Использование метода анализа размерностей при моделировании технологии ЛУВО применительно к СПФ. Для анализа физических процессов, протекающих в NiTi сплавах с эффектом памяти формы (СПФ), подвергнутых ЛУВО, был использован метод

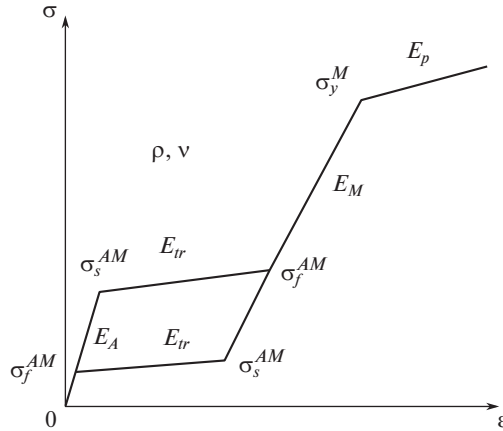


Рис. 2. Кривая напряженно-деформированного состояния сплава с памятью формы и его основные механические характеристики.

анализа размерностей. Главными параметрами, контролирующими все основные протекающие процессы при ЛУВО, являются пиковое давление в ударной волне P_m , длительность импульса τ и радиус лазерного пятна R [8].

Известно [1], что существуют всего одиннадцать основных параметров, которые полностью определяют механическое поведение материала сплава с памятью формы (рис. 2). Это – модуль упругости аустенита E_A , модуль упругости мартенсита E_M , плотность материала ρ , коэффициент Пуассона ν , начальное напряжение прямого мартенситного превращения σ_s^{AM} , конечное напряжение прямого мартенситного превращения σ_f^{AM} , начальное напряжение обратного превращения σ_s^{MA} , конечное напряжение обратного превращения σ_f^{MA} , модуль деформационного упрочнения E_p , предел текучести мартенсита σ_y^M и модуль пластичности E_p . Предполагается, что объемное сжатие материала описывается гидроупругопластической моделью, поэтому исследуемые параметры материала также включают коэффициенты мартенсита и аустенита, встречающихся в определяющем соотношении Ми–Грюнеизена: показатель адиабаты γ , и коэффициенты b_A, b_M, c_A, c_M [1].

Как правило, при ЛУВО толщина исследуемого образца достаточно велика по сравнению с зоной влияния ЛУВО, и, соответственно, толщину можно считать бесконечно большой. Поэтому, логично предположить, что главное влияние ЛУВО на СПФ характеризуется глубиной пластической зоны вдоль оси лазерного луча L_p и поверхностным остаточным напряжением в центре ЛУВО σ_m , которые, в свою очередь, являются функциями управляющих параметров, характеризующих лазерное воздействие и свойства материала:

$$L_p = f_1(P_m, \tau, R, E_A, E_M, E_{tr}, E_p, \rho, \nu, \sigma_s^{AM}, \sigma_f^{AM}, \sigma_s^{MA}, \sigma_f^{MA}, \sigma_y^M, \gamma, b_A, c_A, b_M, c_M), \quad (1)$$

$$\sigma_m = f_2(P_m, \tau, R, E_A, E_M, E_{tr}, E_p, \rho, \nu, \sigma_s^{AM}, \sigma_f^{AM}, \sigma_s^{MA}, \sigma_f^{MA}, \sigma_y^M, \gamma, b_A, c_A, b_M, c_M). \quad (2)$$

Принимая в качестве величин с независимыми размерностями длительность импульса τ , мартенситный модуль упругости E_M и плотность материала ρ , и применяя к уравнениям (1) и (2) пи-теорему [9], получим следующие безразмерные соотношения

$$\frac{L_P}{R} = f_1 \left(\frac{P_m}{\sigma_y^M}, \frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}}, \frac{E_A}{E_M}, \frac{E_{tr}}{E_M}, \frac{E_P}{E_M}, \frac{\sigma_s^{AM}}{E_A}, \frac{\sigma_f^{AM}}{E_M}, \frac{\sigma_s^{MA}}{E_M}, \frac{\sigma_f^{MA}}{E_A}, \frac{\sigma_y^M}{E_M}, \right. \\ \left. \frac{c_A}{\sqrt{E_A/\rho}}, \frac{c_M}{\sqrt{E_M/\rho}}, \gamma, b_A, b_M, \nu \right), \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y^M} = f_2 \left(\frac{P_m}{\sigma_y^M}, \frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}}, \frac{E_A}{E_M}, \frac{E_{tr}}{E_M}, \frac{E_P}{E_M}, \frac{\sigma_s^{AM}}{E_A}, \frac{\sigma_f^{AM}}{E_M}, \frac{\sigma_s^{MA}}{E_M}, \frac{\sigma_f^{MA}}{E_A}, \frac{\sigma_y^M}{E_M}, \right. \\ \left. \frac{c_A}{\sqrt{E_A/\rho}}, \frac{c_M}{\sqrt{E_M/\rho}}, \gamma, b_A, b_M, \nu \right). \quad (4)$$

Всего имеем 16 независимых безразмерных параметров

$$\xi_1 = \frac{P_m}{\sigma_y^M}, \quad \xi_2 = \frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}}, \quad \xi_3 = \frac{E_A}{E_M}, \quad \xi_4 = \frac{E_{tr}}{E_M}, \quad \xi_5 = \frac{E_P}{E_M}, \\ \xi_6 = \frac{\sigma_s^{AM}}{E_A}, \quad \xi_7 = \frac{\sigma_f^{AM}}{E_M}, \quad \xi_8 = \frac{\sigma_s^{MA}}{E_M}, \quad \xi_9 = \frac{\sigma_f^{MA}}{E_A}, \quad \xi_{10} = \frac{\sigma_y^M}{E_M}, \quad \xi_{11} = \frac{c_A}{\sqrt{E_A/\rho}}, \\ \xi_{12} = \frac{c_M}{\sqrt{E_M/\rho}}, \quad \xi_{13} = \gamma, \quad \xi_{14} = b_A, \quad \xi_{15} = b_M, \quad \xi_{16} = \nu.$$

Приведем физический смысл введенных вышеуказанных безразмерных параметров: $\frac{P_m}{\sigma_y^M}$ – характеризует степень пластической деформации; $\frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}}$ – характеризует отношение длительности лазерного импульса к длительности его релаксации в исследуемом образце; $\frac{E_A}{E_M}, \frac{E_{tr}}{E_M}, \frac{E_P}{E_M}$ – характеризуют модуль упругости аустенита, модуль деформационного упрочнения и модуль пластичности, соответственно; $\frac{\sigma_s^{AM}}{E_A}, \frac{\sigma_f^{AM}}{E_M}, \frac{\sigma_s^{MA}}{E_M}, \frac{\sigma_f^{MA}}{E_A}$ – характеризуют упругую деформацию в начале прямого мартенситного превращения, в конце прямого мартенситного превращения, в начале обратного мартенситного превращения и конце обратного мартенситного превращения, соответственно; $\frac{\sigma_y^M}{E_M}$ – характеризует предел упругой деформации; $\frac{c_A}{\sqrt{E_A/\rho}}, \frac{c_M}{\sqrt{E_M/\rho}}$ – характеризуют продольные скорости звука в аустенитной и мартенситной фазах, соответственно; γ, b_A, b_M – являются: показателем адиабаты, и коэффициентами в определяющем соотношении Ми–Грюнейзена, соответственно; ν – представляет собой коэффициент Пуассона образца (TiNi).

В случае, когда исследуемый образец фиксирован и зашемлен по краям (как в нашем случае), 14 из 16 безразмерных параметров в правых частях уравнений (3) и (4), связанных с материалом (последние 14 членов), являются постоянными величинами. Следовательно, для этого случая указанные уравнения существенно упрощаются (остаются только параметры, связанные с лазерным излучением)

$$\frac{L_P}{R} = f_1 \left(\frac{P_m}{\sigma_y^M}, \frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y^M} = f_2 \left(\frac{P_m}{\sigma_y^M}, \frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}} \right). \quad (6)$$

Этот факт указывает на то, что метод анализа размерностей полностью применим для изучения воздействия ЛУВО на СПФ [6, 9]. Из уравнений (5) и (6) также следует

важное с практической точки зрения заключение, что в исследуемом материале при каждом лазерном импульсе с одинаковыми параметрами воздействия будут индуцированы одинаковые распределения остаточных напряжений, так как безразмерные параметры $\frac{P_m}{\sigma_y^M}$ и $\frac{\tau}{R/\sqrt{E_M/\rho}}$ в процессе ЛУВО остаются неизменными.

Определяющее соотношение для СПФ. Как известно [1], в сплавах с памятью формы при нагружении и разгрузке при температуре, выше температуры окончания аустенитного превращения, наблюдается сверхупругое поведение, что связано с деформациями, индуцированными при прямом мартенситном превращении во время нагружения и обратном мартенситном превращении при разгрузке. Определяющее соотношение для СПФ должно одновременно учитывать и фазовые превращения, и пластическое деформирование мартенсита, что существенно отличается от определяющих соотношений для традиционных металлов.

Исходя из предположения о малости деформации, полная деформация состоит из трех частей [10]: первая часть (ϵ^e) является упругой деформацией; вторая часть (ϵ^{tr}) является деформацией преобразования из аустенитной фазы в деформацию, индуцированную мартенситной фазой; третья часть (ϵ_M^p) является пластической деформацией, вызванной необратимым пластическим скольжением мартенсита при высоких напряжениях

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{tr} + \epsilon_M^p. \quad (7)$$

Установив внутреннюю переменную материала в виде некоей объемной доли мартенсита z ($0 \leq z \leq 1$), можно получить определяющее соотношение – зависимость упругого напряжения от упругих деформаций в следующем виде [10]

$$\sigma = \frac{D(z)}{\epsilon - \epsilon^{tr} - \epsilon_M^p}. \quad (8)$$

Вариации матрицы модуля упругости $D(z)$ при деформациях, вызванных мартенситными превращениями, можно описать установлением зависимости D от внутренней переменной материала z в виде [10]

$$D(z) = (1 - z)D_A + zD_M, \quad (9)$$

где D_A и D_M – являются тензорами эквивалентных модулей упругости аустенитной и мартенситной фаз, соответственно.

Модель прямого и обратного мартенситных превращений. Процессы мартенситных превращений очень важны для сплавов с памятью формы, т.к. именно они являются основной причиной главных эффектов СПФ – эффектов памяти формы и сверхупругости. Обобщенная модель пластичности для СПФ впервые было использовано Люблинером и Ауриккио для описания прямого и обратного мартенситных превращений [7]. Здесь вводятся т.н. поверхности преобразования Друкера–Прагера

$$F_y^{AM}(\sigma, z) = \bar{\sigma} - \sigma_s^{AM}(z) = 0 \text{ – прямое мартенситное превращение,} \quad (10a)$$

$$F_y^{MA}(\sigma, z) = \bar{\sigma} - \sigma_s^{MA}(z) = 0 \text{ – обратное мартенситное превращение,} \quad (10b)$$

где $\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение; z – объемная доля мартенсита; $\sigma_s^{AM}(z)$, $\sigma_s^{MA}(z)$ – начальные напряжения прямого и обратного мартенситных превращений, соответственно.

Как и при классической пластичности, приращения деформаций при мартенситных превращениях подчиняются так называемому правилу ортогональности, т.е. приращения деформации при мартенситных превращениях перпендикулярны к соответствующим поверхностям преобразований [11]

$$d\epsilon^{tr} = d\gamma \frac{\partial F_y^{AM}(\sigma, z)}{\partial \sigma}, \quad d\gamma > 0 \text{ – прямое мартенситное превращение,} \quad (11a)$$

$$d\varepsilon^{tr} = d\gamma \frac{\partial F_y^{MA}(\sigma, z)}{\partial \sigma}, \quad d\gamma < 0 - \text{обратное мартенситное превращение}, \quad (116)$$

где $d\gamma$ – приращение множителя деформаций при мартенситных превращениях. Процесс упрочнения при мартенситных превращениях описывается с помощью модуля деформационного упрочнения E_{tr} (рис. 2).

Модель пластичности. После окончания мартенситного превращения и в случае, когда приложенная нагрузка превышает предел текучести мартенсита, происходит пластическая деформация. Предполагается, что пластическая деформация при этом подчиняется условию текучести Мизеса [10]

$$F_y^{MP}(\sigma, \varepsilon_p) = \bar{\sigma} - \sigma_y^M(\varepsilon_p) = 0, \quad (12)$$

где $\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение; σ_y^M – представляет собой напряжение текучести, вызванное мартенситной деформацией.

Приращение пластической деформации определяется выражением

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial F_y^{MP}(\sigma, \varepsilon_p)}{\partial \sigma}, \quad (13)$$

где $d\lambda$ – приращение множителя пластической деформации. Поведение мартенсита при пластическом упрочнении описывается модулем пластического упрочнения E_p (рис. 2).

Конечно-элементное моделирование. Поскольку процесс ЛУВО сопровождается высокоскоростным ударом и динамическим распространением ударных волн, необходимо использование конечноэлементного пакета с возможностью явного интегрирования по времени. Для этих целей удобным является пакет ABAQUS/Explicit. Поскольку время полного развития пластической деформации в материале во время процесса ЛУВО занимает намного больше времени, чем длительность самого лазерного импульса, время расчета должно быть достаточно большим. Более подробно особенности применения конечно-элементного моделирования применительно к ЛУВО изложены в работах [12–14].

При конечноэлементном моделировании ЛУВО для СПФ была использована специальная пользовательская подпрограмма (VUMAT), имеющейся в распоряжении ABAQUS/Explicit, которая позволяет использование обобщенной пластической модели Люблинера–Аурикио [7]. Свойства исследуемого сплава с памятью формы приведены в табл. 1 [10, 15].

Основные определяющие параметры, показанные на рис. 2, получены из квазистатической кривой напряжение–деформация при растяжении используемого сплава NiTi [10]. Коэффициенты Ми–Грюнейзена взяты из [15]. Соответствующие им безразмерные параметры при численном моделировании остаются постоянными (табл. 2).

Проверка сходимости численной модели. Сходимость результатов численного моделирования была подтверждена сравнением с экспериментальными результатами из [16]. Смоделированные поверхностные остаточные напряжения показаны на рис. 3 (сплошная линия), где минимальная длина элементов $\xi^* = L_{\min}/R = 0.006$, шаг по времени $\Delta t^* = \Delta t/\tau = 0.005$ и общее время счета $t^* = t/\tau = 5000$. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами (черные квадратики), что подтверждает сходимость численного моделирования при выбранных параметрах $\xi^* = 0.006$, $\Delta t^* = 0.005$ и $t^* = 5000$. Поэтому эти же значения параметров ξ^* , Δt^* и t^* были использованы при моделировании ЛУВО для СПФ.

Разработанная методика по использованию анализа размерностей для моделирования технологии ЛУВО применительно к СПФ была реализована в конечноэлементном пакете ABAQUS/Explicit, где проводятся параметрические исследования по уста-

Таблица 1. Физико-механические характеристики сплавов NiTi с памятью формы

Свойства материала, (единица)	Величина
Модуль Юнга аустенита, E_A (ГПа)	80
Модуль Юнга мартенсита, E_M (ГПа)	40
Коэффициент Пуассона, ν	0.33
Плотность, ρ (г/см ³)	6.45
Начальное напряжение прямого мартенситного превращения, σ_s^{AM} (МПа)	500
Конечное напряжение прямого мартенситного превращения, σ_f^{AM} (МПа)	550
Начальное напряжение обратного мартенситного превращения, σ_s^{MA} (МПа)	300
Конечное напряжение обратного мартенситного превращения, σ_f^{MA} (МПа)	250
Модуль деформационного упрочнения, E_{tr} (ГПа)	2.86
Предел текучести мартенсита, σ_y^M (МПа)	1100
Модуль пластичности, E_p (ГПа)	4.0
Скорость звука в аустените, c_A (м/с)	5.12×10^3
Скорость звука в мартенсите, c_M (м/с)	3.56×10^3
Константа Ми–Грюнейзена аустенита, b_A	–3.88
Константа Ми–Грюнейзена мартенсита, b_M	4.87
Показатель адиабаты, γ	2.0

новлению степени влияния вышеуказанных безразмерных параметров на отклик материалов на ЛУВО (в основном, это – возникновение остаточных напряжений).

При исследованиях задаются различные диапазоны безразмерных входных параметров ЛУВО: $P_m/\sigma_y^M \in (2.73, 10.91)$, $\tau/(R/\sqrt{E_M/\rho}) \in (0.0025, 0.1000)$, и анализируются их влияния на выходные параметры процесса: остаточные напряжения и другие механические характеристики.

Полученные результаты расчетов и их анализ. Здесь моделируется влияние длительности лазерного импульса и пикового давления в ударной волне на возникающие при ЛУВО остаточные напряжения. Результаты моделирования приведены на рис. 4. На рис. 4а показано влияние лазерного воздействия (безразмерные длительность лазерного импульса и пиковое давление в ударной волне) на возникающие максимальные остаточные напряжения. Безразмерное пиковое давление меняется в диапазоне от 2.73 до 10.91, безразмерная длительность лазерного импульса меняется в диапазоне от 0.0025 до 0.1. Остальные безразмерные параметры остаются постоянными, и они приведены в табл. 2. Видно, что максимальные остаточные напряжения практически не зависят от длительности импульса при пиковых давлениях, меньших величины 5.45. Когда пиковое давление превышает значение 5.45, максимальные остаточные напряжения приобретают тенденцию к снижению по мере увеличения продолжительности импульса. Это, по-видимому, происходит потому, что в нашем моделировании используется круглое лазерное пятно, а в этом случае, как обнаружили в [17], возникает т.н. эффект “дырки остаточных напряжений”, который заключается в том, что в центре лазерного пятна одновременно фокусируются волны разрежения, отраженные с краев образца после их достижения ударными волнами.

На рис. 4б показано влияние безразмерной длительности лазерного импульса и пикового давления в ударной волне на глубину пластической зоны. Глубина пластической зоны монотонно увеличивается с увеличением продолжительности импульса в случае, когда пиковое давление меньше величины 7.27. Когда безразмерное пиковое

Таблица 2. Безразмерные параметры сплавов NiTi с памятью формы

Безразмерные параметры	Величина
$\frac{E_A}{E_M}$	2.00
$\frac{E_{lr}}{E_M}$	0.071
$\frac{E_P}{E_M}$	0.71
$\frac{\sigma_s^{AM}}{E_A}$	6.25×10^{-3}
$\frac{\sigma_f^{AM}}{E_M}$	1.38×10^{-2}
$\frac{\sigma_s^{MA}}{E_M}$	7.50×10^{-3}
$\frac{\sigma_f^{MA}}{E_A}$	3.12×10^{-3}
$\frac{\sigma_y^M}{E_M}$	2.75×10^{-2}
$\frac{c_A}{\sqrt{E_A/\rho}}$	1.45
$\frac{c_M}{\sqrt{E_M/\rho}}$	1.43
γ	2.0
b_A	-3.88
b_M	4.87
ν	0.33

давление в ударной волне превышает значение 7.27, глубина пластической зоны при увеличении продолжительности импульса начинает проявлять нелинейные характеристики. Так, например, при безразмерной длительности лазерного импульса, меньше значения 0.0747, глубина пластической зоны однозначно увеличивается с увеличением пикового давления в ударной волне, однако, когда длительность импульса превышает значение 0.0747, глубина пластической зоны сначала увеличивается, а затем немного уменьшается с увеличением пикового давления.

Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования. На рис. 5 приведено сравнение экспериментальных результатов [16] зависимости безразмерной глубины пластической зоны $L_P/(\sqrt{E_M/\rho}\tau)$ от безразмерного пикового давления в ударной волне P_m/σ_y^M с результатами, полученными анализом размерностей, где модуль упругости мартенсита E_M , плотность ρ и предел текучести деформируемого мартенсита σ_y^M взяты из табл. 1, а длительность давления τ принята равной 20 нс.

Видно, что полученная при расчетах линейная зависимость между безразмерной глубиной пластической зоны и безразмерного пикового давления в ударной волне, достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

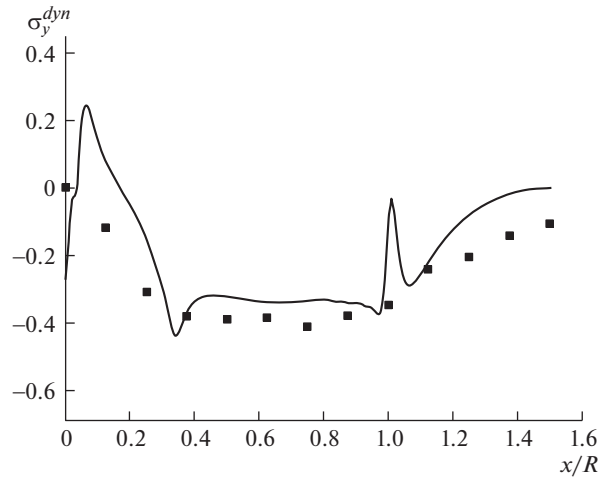


Рис. 3. Сравнение распределения безразмерных остаточных напряжений (σ_x/σ_y^{dyn} , где σ_y^{dyn} – динамический предел текучести) по поверхности в направлении x (x/R), полученных конечноэлементным моделированием (сплошная линия) с результатами экспериментальных исследований из [16] (черные квадратики), в которых используются один и тот же материал и одинаковое пиковое давление в ударной волне.

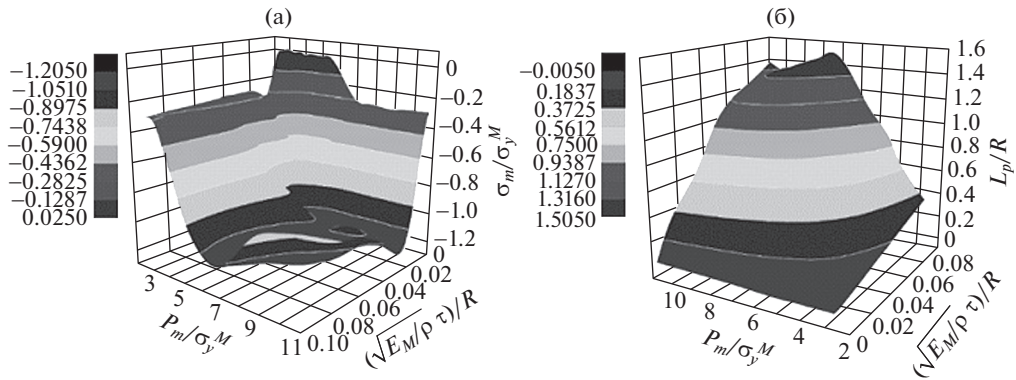


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования: (а) – влияние длительности импульса лазерного излучения и пикового давления в ударной волне на максимальные остаточные напряжения; (б) – влияние длительности импульса лазерного излучения и пикового давления в ударной волне на глубину пластической зоны.

Максимальное пиковое давление ударной волны в экспериментах было 8.8 ГПа (рис. 5). Из-за естественных ограничений, существующих при проведении сложных экспериментальных исследований, пока не удалось провести ЛУВО-эксперименты при более высоких пиковых давлениях. Поэтому верификация нелинейной характеристики, полученной с помощью анализа размерностей при давлениях в ударной волне, больших 8.8 ГПа, нуждается в дальнейших экспериментальных подтверждениях.

Выводы. Исследованы возможности применения анализа размерностей и конечно-элементного моделирования при лазерно-ударно-волновой обработке титановых сплавов (NiTi) с памятью формы. Основные выводы заключаются в следующем:

1. Установлено, что основными безразмерными параметрами, управляющими распре-

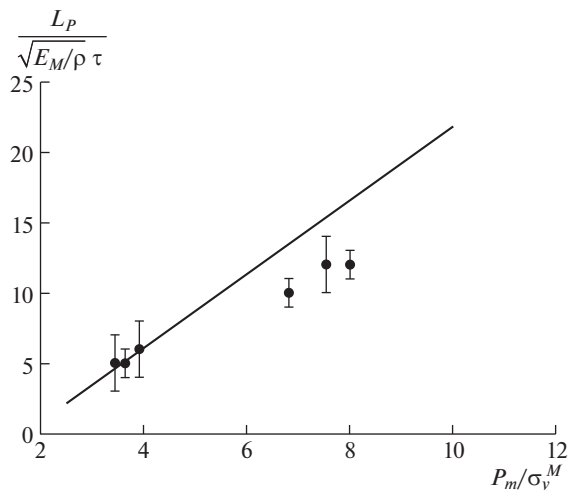


Рис. 5. Сравнение экспериментальных результатов [14] зависимости безразмерной глубины пластической зоны $L_p / (\sqrt{E_M / \rho} \tau)$ (круглые точки) от безразмерного пикового давления в ударной волне (P_m / σ_y^M) с результатами численного моделирования (прямая линия).

делением остаточных напряжений и глубиной пластической зоны, возникающих при ЛУВО, являются безразмерные длительность действия лазерного импульса и пиковое давление в ударной волне. **2.** Показано, что глубина пластической зоны линейно увеличивается с увеличением длительности импульса и пикового давления в ударной волне, пока пиковое давление меньше безразмерной величины 7.27. Когда пиковое давление превышает 7.27, глубина пластической зоны показывает нелинейные характеристики. Предположительно, такая двухступенчатая характеристика может быть обусловлена т.н. эффектом “дырки остаточных напряжений”, т.е., взаимодействием сжимающих волн, возникающих при ЛУВО, с волнами разрежения, возникающих при отражении сжимающих волн с краев образца. **3.** Проведена сравнительная оценка между смоделированной зависимостью безразмерной глубины пластической зоны от безразмерного пикового давления в ударной волне и соответствующими экспериментальными исследованиями из литературы, которая при давлениях, меньших 8.8 ГПа, показала приемлемую сходимость между ними, что подтверждает достоверность разработанных в настоящей работе численной модели для анализа поведения СПФ, подвергнутых ЛУВО.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект RFMEFI60719X0300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kazuhiro O., Clarence W.* Shape Memory Materials. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1999. 348 P. ISBN 0521663849.
2. *Sergueeva A.V., Song C., Valiev R.Z., Mukherjee A.K.* Structure and properties of amorphous and nanocrystalline NiTi prepared by severe plastic deformation and annealing // Mater. Sci. Eng. A. 2003. V. 339. P. 159.

3. *Liao Y., Ye C., Lin D., Suslov S., Cheng G.* Deformation induced martensite in NiTi and its shape memory effects generated by low temperature laser shock peening // *J. Appl. Phys.* 2012 . V. 112. 033515.
4. *Luo K.Y., Lu J.Z., Zhang Y.K., Zhou J.Z., Zhang L.F., Dai F.Z., Zhang L., Zhong J.W., Cui C.Y.* Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel // *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. V. 528. P. 4783.
5. *Wu B.X., Shin Y.C.* From incident laser pulse to residual stress: A complete and self-closed model for laser shock peening // *J. Manuf. Sci. Eng.-Trans. ASME.* 2007. V. 129. P. 117.
6. *Wu X.Q., Tan Q.M., Huang C.G.* Geometrical Scaling Law for Laser Shock Peening // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 114. 043105.
7. *Lubliner J., Auricchio F.* Generalized plasticity and shape-memory alloys // *Int. J. Solids Struct.* 2006. V. 33. P. 991.
8. *Arif A.F.* Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. V. 136. P. 120.
9. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд. М.: Наука, 1977. 440 с.
10. *Mezjere Y.J.E., Millett J.C.F., Bourne N.K.* Equation of state and mechanical response of NiTi during one-dimensional shock loading // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100. 033513.
11. *Wu X.Q., Tan Q.M., Huang C.G.* Geometrical Scaling Law for Laser Shock Peening // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 114. 043105.
12. *Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г., Кавтарадзе П.З.* Применение лазерно-ударно-волновой обработки для повышения трещиностойкости материалов // *Вестник машиностроения.* 2020. № 10. С. 42.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-10-42-48>
13. *Сахвадзе Г.Ж., Киквидзе О.Г.* Роль технологии лазерно-ударно-волновой обработки в динамике роста усталостных трещин в образцах из титановых сплавов ВТ6, подвергнутых повреждениям посторонними предметами // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2020. № 3. С. 90.
14. *Сахвадзе Г.Ж.* Повышение трещиностойкости материалов с использованием технологии лазерно-ударно-волновой обработки // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2020. № 4. С. 76.
<https://doi.org/10.31857/S0235711920040124>
15. *Mezjere Y.J.E., Millett J.C.F., Bourne N.K.* Equation of state and mechanical response of NiTi during one-dimensional shock loading // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100. 033513.
16. *Ballard P., Fournier J., Fabbro R.* Residual stresses induced by laser-shocks // *J. Phys. IV.* 2001. V. 1. P. 487.
17. *Ding K.* Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes // *Surf. Eng.* 2013. V. 19. P. 351.