

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТАЗОБЕДРЕННОМ СУСТАВЕ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT-6, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКЕ

© Геронтий Жорович Сахвадзе<sup>1</sup>, Омар Георгиевич Киквидзе<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия<sup>2</sup>Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия[sakhvadze@mail.ru](mailto:sakhvadze@mail.ru)

**Аннотация.** В настоящей работе проводится конечноэлементное моделирование сжимающих остаточных напряжений в имплантатах тазобедренных суставов из титановых сплавов VT-6, возникающих при лазерно-ударно-волновой обработке (ЛУВО), с использованием метода собственных деформаций.

**Ключевые слова:** лазерно-ударно-волновая обработка (ЛУВО), метод конечных элементов, собственные деформаций, тазобедренный сустав, остаточные напряжения, титановый сплав VT-6.

## RESIDUAL STRESSES MODELING IN THE HIP REPLACEMENTS OF TITANIUM ALLOYS Ti6Al4V, ARISING AT THE LASER SHOCK PROCESSING

© G.Zh. Sakhvadze<sup>1</sup>, O.G. Kikvidze<sup>2</sup><sup>1</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia<sup>2</sup>Ak. Tsereteli State University, Kutaisi, Georgia[sakhvadze@mail.ru](mailto:sakhvadze@mail.ru)

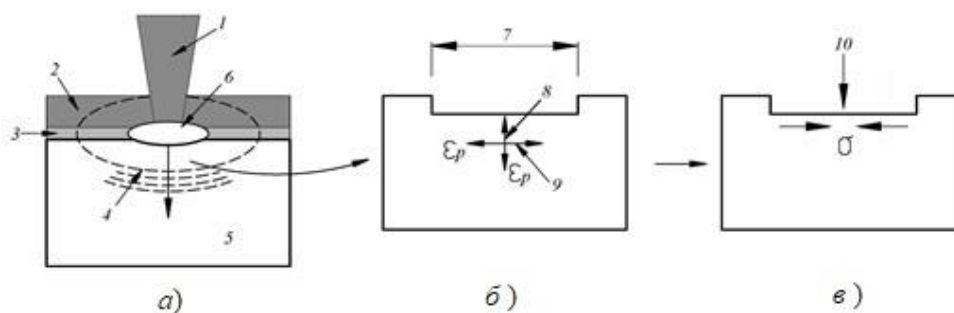
**Abstract.** In the present paper is presented finite element modeling of compressive residual stresses in the implants of the hip replacement of titanium alloys Ti6Al4V, arising at the laser shock processing (LSP), using the eigenstrain simulation.

**Keywords:** laser shock processing, finite element modeling, eigenstrain, hip replacement, compressive residual stresses, Ti6Al4V.

Общая методология технологии лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) материалов состоит в следующем: обрабатываемую поверхность (рис. 1а, позиция 5) покрывают 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. Энергия лазерного импульса (1) 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 [1]. Параметры процесса, необходимые для реализации технологии ЛУВО, таковы: нужен короткий (в диапазоне 3-30 нс) и интенсивный ( $> 1 \text{ ГВт/см}^2$ ) лазерный импульс, перпендикулярно направленный на поверхность исследуемого материала. Поверхностный слой при этом мгновенно испаряется (явление абляции) и образуется приповерхностная плазма (6) с высокими температурой (приблизительно 10000 К) и давлением ( $> 2 \text{ ГПа}$ ). Плазма при расширении в результате быстропротекающих физико-химических процессов и фазовых превращении излучает ударные волны (4), и механические импульсы распространяются как в среде, так и в твердом теле.

Главным результатом применения технологии ЛУВО является создание в приповерхностной области полей мощных сжимающих остаточных напряжений (СОН), которые благоприятно влияют на такие фундаментальные механические характеристики материалов, как прочность, долговечность, износ- и коррозионостойкость. Основными пользователями технологии ЛУВО являются крупные промышленные, военные и космические корпорации (Airbus, Boeing, General Electric, Rolls-Royce, Pratt & Whitney и другие). Кроме того, корпорация Toshiba развила применение ЛУВО-технологии для повышения безопасности атомных реакторов. В последнее время данная технология широко стали применяться в машиностроении и биомедицине. Настоящая работа посвящена применению ЛУВО к биопротезам.



**Рис.1.** Схематическое представление технологии ЛУВО и механизма возникновения остаточных напряжений: а) принципиальная схема технологии ЛУВО; б) возникновение пластических деформаций в приповерхностной области; в) возникновение остаточных напряжений.

1 – лазерный импульс; 2- прозрачный слой; 3 – непрозрачный слой; 4 – ударная волна; 5 – исследуемый материал; 6- плазма; 7 – область воздействия лазерного импульса; 8 - сжатый в вертикальной плоскости материал (отрицательные пластические деформации); 9 - растянутый в горизонтальной плоскости материал (положительные пластические деформации); 10 – релаксация деформируемого материала, вызывающей создание поля сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое

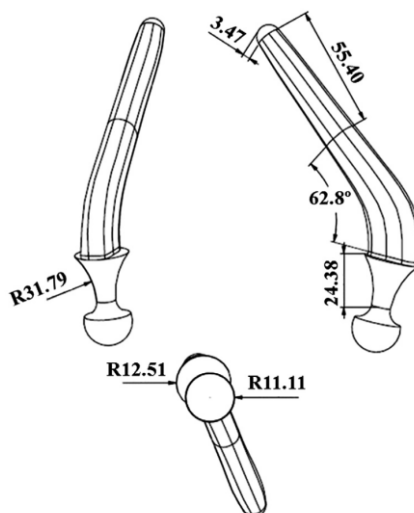
Титановые сплавы ВТ-6 хорошо известны за их превосходные механические свойства и за их хорошую биологическую совместимость, делаю их привлекательными в качестве имплантатов [2]. Протезы из ВТ-6 тазобедренного сустава успешно применяются в последнее время [2-3]. В основном, цель хирургического введения искусственного тазобедренного сустава состоит в том, чтобы максимально восстановить кинематику опорно-двигательной системы пациента, выдерживая при этом естественные физиологические нагрузки, минимизировав износ и трение в суставе, избегая вредные реакции со стороны организма.

Обычно возможные механизмы разрушения введенного в организм протеза тазобедренного сустава классифицируются на основе их функциональной продолжительности: 1) краткосрочные воздействия, такие как внезапная инфекция или вывих; 2) среднесрочные

воздействия, главным образом вызванные механическим разрушением одного или нескольких компонентов имплантата; 3) длительный воздействия из-за усталостного разрушения одного или нескольких компонентов имплантата [4]. Целью настоящих исследований является превенция третьего механизма разрушения посредством упрочнения приповерхностной области.

В последние два десятилетия качество протезов тазобедренного сустава значительно улучшилось, при этом каждая новая конструкция имплантата стремится быть более устойчивой к усталостному разрушению [3]. Для этих целей широко используется традиционное дробеструйное упрочнение для создания сжимающих остаточных напряжений. Недавние исследования показали, что ЛУВО обеспечивает создание более глубоких сжимающих остаточных напряжений и усталостная прочность повышается по сравнению с дробеструйным упрочнением. В настоящей работе мы численно исследуем тазобедренный сустав из титанового сплава ВТ-6 при его упрочнении по технологии ЛУВО. Несмотря на возникающие вычислительные трудности при моделировании технологии ЛУВО на больших площадях и криволинейных 3D-геометриях, удалось избежать возникших трудностей с помощью использования метода собственных деформаций.

**Материал и геометрические особенности тазобедренного сустава.** Выбранный материал для численного анализа в настоящих исследованиях – известный биосовместимый материал - титановый сплав ВТ-6. Выбранная форма тазобедренного сустава – стандартный протез Чарнли (Charnley), геометрические особенности которого представлены на рис. 2 [2]. Геометрия протеза сильно влияет на его биомеханические характеристики, а также и на биосовместимость [2-3]. Форма протеза Чарнли с гладкими поверхностями уменьшают концентрации напряжения и увеличивают долговечность протеза. Сложность геометрии протеза Чарнли требует тщательной предварительной подготовки его макета в САЕ-системе в виде IGES-файла прежде, чем импортировать его для проведения расчетов в конечноэлементных пакетах LS-DYNA и ANSYS.



**Рис.2.** Геометрические особенности протеза тазобедренного сустава Чарнли (Charnley). Размеры показаны в мм.

**Концепция метода собственных деформаций.** Прежде всего, необходимо создание наглядной физической модели, объясняющей механизм возникновения пластических деформаций, и, соответственно, остаточных напряжений, возникающих при ЛУВО. После этого следует выбрать адекватные численные методы для реализации данной физической модели.

При однократном ЛУВО (рис. 1а) во время и в области воздействия лазерного излучения поверхностный слой испытывает растягивающие пластические деформации в горизонтальной плоскости и сжимающие пластические деформации - в вертикальной плоскости (рис.1 б). После прекращения воздействия лазерного импульса наступает период релаксации напряжений, во время которой деформированная часть материала подвергается сжатию со стороны окружающей ее недеформированной части материала (рис.1 в). Таким образом, пластические деформации, вызванные ударной волной, созданной при ЛУВО, генерируют в материале поле сжимающих остаточных напряжений (СОН). Отклик материала можно считать упругим, т.к. к моменту начала процесса релаксации пластические деформации уже полностью сформированы и они стабильны. Поэтому имеем все основания считать, что поле СОН, сформированных при ЛУВО, является статическим упругим откликом материала на начальную ударную волну в случае, если предварительно там введены уже сформированные стабильные пластические деформации (т.н. «собственные деформации»). Важно заметить, что использование термина «собственная деформация» позволяет исследователю абстрагироваться от природы возникновения той или иной пластической деформации.

В настоящей работе предлагается практическая реализация в конечноэлементных пакетах LS-DYNA и ANSYS сравнительно нового подхода для решения задач определения остаточных напряжений при ЛУВО.

Термин «собственные деформации» впервые ввел Рейснер (*Reissner*) в 1931 году [5]. Под этим термином он понимал неупругие деформации, соответствующие самоуравновешенным остаточным напряжениям. В 1991 году Мура (*Mura*) [6] предложил более общее определение собственной деформации (*eigenstrain*), принятое в современной научной литературе. В рамках геометрически линейной теории это могут быть неупругие деформации любой природы (температурные, пьезоэлектрические, пластические, ростовые, фазовые и др.). Использование термина собственной деформации позволяет исследователю абстрагироваться от природы возникновения той или иной собственной деформации.

Деформаций будем считать аддитивными, в этом случае тензор малой деформации  $\varepsilon$  можно представить суммой упругой  $\varepsilon_e$  и собственной  $\varepsilon^*$  деформаций [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon^*. \quad (1)$$

В большинстве случаев наличие в теле собственных деформаций для удовлетворения условиям совместности деформации требует наличия и упругих деформации (т.е., в таких задачах собственные деформации выступают в роли своего рода источника несовместности деформации [7]). Важно заметить, что эти упругие деформации должны удовлетворять обобщенному закону Гука, устанавливающего линейную зависимость между упругими деформациями и упругими напряжениями. Если внешних воздействий на тело нет, то вышеупомянутые поля представляют собой поле упругих остаточных деформаций и поле остаточных напряжений, соответственно.

Метод собственных деформаций в настоящее время широко применяется для моделирования остаточных напряжений на разных масштабных уровнях, сильно сократив при этом время на вычисления.

В случае отсутствия собственных деформаций любое упругое тело свободно от остаточных напряжений. Продолжая аналогию, можно заключить, что случай наличия остаточных напряжений может быть представлен как некое распределение по исследуемому объему собственных деформаций (как в конечноэлементном моделировании, так и аналитических исследованиях). Решение для остаточных напряжений  $\sigma_{ji}$  в таком случае должно удовлетворять:

1) уравнениям равновесия, т.е. на поверхности тела отсутствуют нагрузки, что в декартовой системе координат выражается уравнениями (2):

$$\sigma_{ji,j} = 0; \quad (2)$$

2) граничным условиям:

$$\sigma_{ji}n_j = 0 ; \quad (3)$$

где  $n$  - нормаль к поверхности тела.

3) условиям совместности деформации:

$$\varepsilon_{ik,jl} + \varepsilon_{il,jk} - \varepsilon_{jk,il} - \varepsilon_{il,jk} = 0 . \quad (4)$$

Из условий совместности деформации, в частности, для деформации  $\varepsilon_{xx}(z)$ , следует:

$$\frac{d^2 \varepsilon_{xx}(z)}{dz^2} = 0 . \quad (5)$$

Отсюда следует, что для удовлетворения условий совместности деформации полные деформации должны быть линейными функциями от  $z$ :

$$\varepsilon_{xx}(z) = C_1 z + C_2 . \quad (6)$$

Кроме того, по своей природе остаточные напряжения являются самоуравновешенными по всему объему  $V$  исследуемого материала:

$$\int_V \sigma_{ij} dV = 0 . \quad (7)$$

Таким образом, метод собственных деформации представляет собой реальный механизм, с помощью которого, после определения собственных деформаций, восстанавливается полное поле распределения остаточных напряжений в материале посредством только упругого анализа.

Результаты показывают [8], что стабильные пластические деформации, генерируемые при ЛУВО, зависят только от параметров лазерного импульса, и мало зависят от геометрии образца, т.е. являются практически геометрически независимыми.

После того, как определено распределение собственных деформаций, вызванное одним конкретным лазерным импульсом, оно может быть распространено для оценки остаточных напряжений, вызванных тем же импульсом в других местах образца (в виду геометрической независимости), получая картину распределения ОН в целом образце.

А. М. Корсунский предложил общий метод определения собственных деформаций [6], который нашел множество приложений, в частности, в задачах сварки, упрочнения, лазерной формовки. Его практическая важность подтверждается тем, что если определены собственные деформации, создаваемые ЛУВО для образцов с простой геометрией, то их можно распространять и на образцы более сложной геометрии. Этот принцип, впервые сформулированный А. М. Корсунским в работе [8], назван им «принципом переносимости собственных деформаций» («Principle of Transferability of Eigenstrain»).

В настоящей работе применяется метод, разработанный Де Волдом и Хиллом [9]: предполагается, что полные остаточные напряжения ( $\sigma_{\text{полн}}$ ), возникающие при ЛУВО, является суперпозицией остаточных напряжений, возникающих непосредственно при ЛУВО ( $\sigma_{\text{ЛУВО}}$ ), и остаточных напряжений, генерируемых материалом на внешнее воздействие, необходимых для удовлетворения условий равновесия, формально названные «остаточными напряжениями равновесия» ( $\sigma_{\text{равн}}$ ):

$$\sigma_{\text{полн}} = \sigma_{\text{ЛУВО}} + \sigma_{\text{равн}} . \quad (8)$$

Эти остаточные напряжения ( $\sigma_{\text{полн}}$ ) в обрабатываемой ЛУВО области материала являются тензором второго порядка с пространственным изменением во всех трех направлениях (в общем случае). Полные остаточные напряжения ( $\sigma_{\text{полн}}$ ) представляют наибольший интерес с точки зрения оценки рабочих характеристик материала образца, так как это они присутствует в образце непосредственно после ЛУВО. Однако остаточные напряжения, непосредственно вызванное технологией ЛУВО ( $\sigma_{\text{ЛУВО}}$ ), как известно, является геометрически независимыми, в то время как остаточное напряжение равновесия ( $\sigma_{\text{равн}}$ ) являются остаточными



напряжениями, призванными удовлетворять уравнения равновесия, обязательно являются геометрически зависимыми.

Остаточные напряжения, непосредственно вызванные технологией ЛУВО ( $\sigma_{\text{ЛУВО}}$ ), можно определить из (9):

$$\sigma_{\text{ЛУВО}} = \sigma_{\text{полн}} - \sigma_{\text{равн}} \quad (9)$$

Рассматривая важный частный случай двухосного распределения напряжений в облучаемой ЛУВО области ( $xy$ ), получим:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{ЛУВО},xx}(z) = \sigma_{\text{полн},xx}(z) - \sigma_{\text{равн},xx}(z) \\ \sigma_{\text{ЛУВО},yy}(z) = \sigma_{\text{полн},yy}(z) - \sigma_{\text{равн},yy}(z) \\ \sigma_{\text{ЛУВО},zz}(z) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Кроме того, остаточное напряжение равновесия ( $\sigma_{\text{равн}}$ ), согласно формуле (6), может быть представлено линейной функцией, коэффициенты которой  $C_1$  и  $C_2$  могут быть вычислены графически с помощью профиля распределения по глубине полных остаточных напряжений ( $\sigma_{\text{полн}}$ ) [4].

$$\begin{cases} \sigma_{\text{ЛУВО},xx}(z) = \sigma_{\text{полн},xx}(z) - \sigma_{\text{равн},xx}(z) = \sigma_{\text{полн},xx}(z) + C_{1,xx}z + C_{2,xx} \\ \sigma_{\text{ЛУВО},yy}(z) = \sigma_{\text{полн},yy}(z) - \sigma_{\text{равн},yy}(z) = \sigma_{\text{полн},yy}(z) + C_{1,yy}z + C_{2,yy} \\ \sigma_{\text{ЛУВО},zz}(z) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, собственные деформации, вызванные технологией ЛУВО, можно определить следующими линейными уравнениями Гука:

$$\varepsilon_{\text{ЛУВО}}^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\text{ЛУВО},xx}^*(z) \\ \varepsilon_{\text{ЛУВО},yy}^*(z) \\ \varepsilon_{\text{ЛУВО},zz}^*(z) \end{bmatrix} = -\frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\text{ЛУВО},xx}(z) \\ \sigma_{\text{ЛУВО},yy}(z) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

где  $E$  - модуль Юнга,  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

Таким образом, мы получаем три компонента собственных деформаций на каждом шаге, продвигаясь от поверхности вглубь материала. Таким образом, процедура решения состоит из трех шагов. 1) Вычисляются все собственные деформации, вызванные с применением технологии ЛУВО ( $\varepsilon_{\text{ЛУВО}}^*$ ) (посредством решения явной задачи динамического анализа посредством МКЭ-пакета LS-DYNA). 2) Вычисленные собственные деформации ( $\varepsilon_{\text{ЛУВО}}^*$ ) вводятся как начальное распределение деформаций для решения упругой задачи (неявна задача ANSYS). 3) Полученные полные остаточные напряжения для части образца, вызванные технологией ЛУВО, распространяются для любых новых участков образца с любой сложной геометрией.

Как известно [8], задача определения остаточных напряжений при заданных пластических и температурных деформациях имеет единственное решение. Этому решению соответствует минимальное значение потенциальной энергии остаточных напряжений:

$$E_{\text{min}} = \int_0^t \left[ \int_V \sigma \dot{\varepsilon}_p dV \right] dt \quad (13)$$

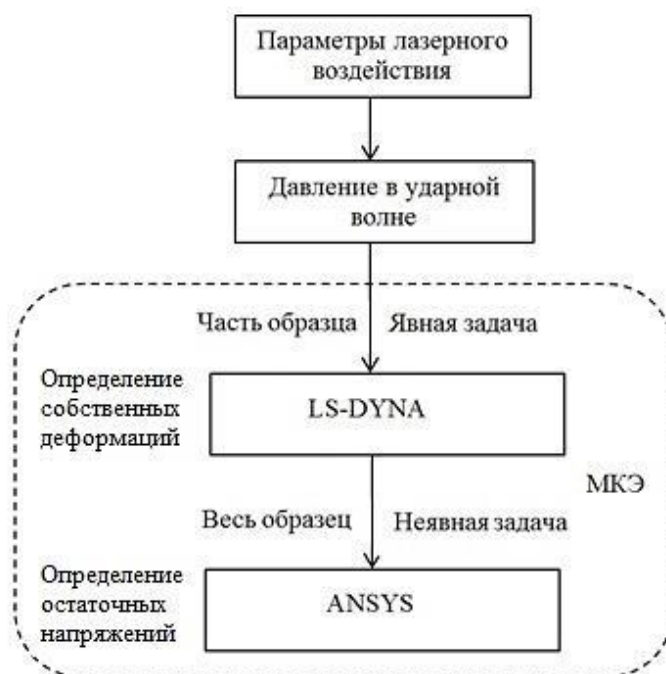
где  $\sigma$  значение напряжения из определяющего соотношения,  $V$  - объем исследуемого образца,  $t$  - время,  $\dot{\varepsilon}_p$  - скорость пластической деформации:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ (\dot{\varepsilon}_{1p} - \dot{\varepsilon}_{2p})^2 + (\dot{\varepsilon}_{2p} - \dot{\varepsilon}_{3p})^2 + (\dot{\varepsilon}_{3p} - \dot{\varepsilon}_{1p})^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{1p}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{2p}$  и  $\dot{\varepsilon}_{3p}$  являются скоростями пластических деформаций в главных направлениях.

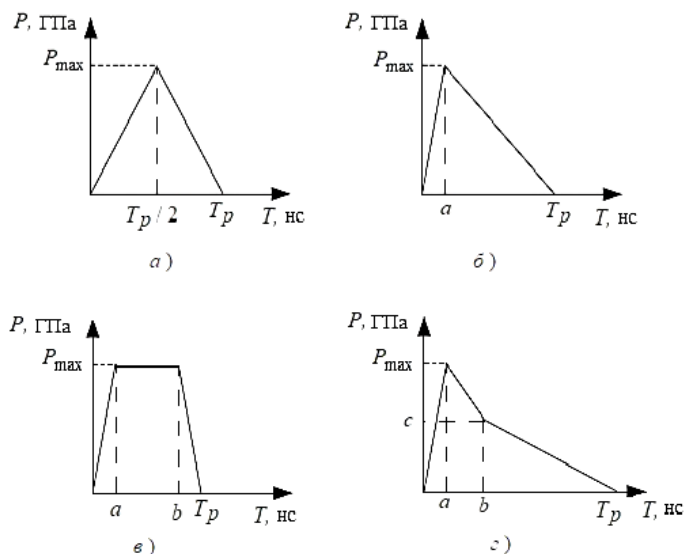
**Стратегия численного моделирования.** Предложенная стратегия численного конечноэлементного моделирования определения полных остаточных напряжений в тазобедренном суставе при ЛУВО состоит из двух шагов: 1) вычисление собственных деформаций, вызванных с применением технологии ЛУВО, решая явную задачу динамического анализа посредством МКЭ-пакета LS-DYNA (номер лицензии 10312012); 2) вычисленные на шаге 1 собственные деформации вводятся в качестве входа для упругого моделирования с целью определения полных остаточных напряжений, вызванных в тазобедренном суставе при ЛУВО, путем решения неявной задачи ANSYS (номер лицензии 660578) (графически это представлено на рис. 3).

**Приложение ударной нагрузки.** Для выбора оптимальной формы импульса и упрощения численного анализа лучше использовать экспериментальные данные, которые показывают [4], что давление сначала резко повышается, а затем медленно снижается. Поэтому в последних исследованиях справедливо аппроксимируют изменение давления треугольным импульсом [10–16].



**Рис.3.** Стратегия численного моделирования

На рис. 4 приведены некоторые возможные варианты простых треугольных приближений: а – пиковое давление  $p_{\max}$  продолжительностью  $T_p$  действует в центре импульса; б – быстрое повышение давления с последующим постепенным снижением; в – аналогичен варианту а, но есть горизонтальный участок, соответствующий  $p_{\max}$ ; г – аналогичен варианту б, но с билинейной формой снижения давления. Так как в настоящей работе основное внимание уделяется физическому моделированию возникновения ОН при ЛУВО, целесообразно выбрать относительно простую форму импульса, например треугольную (см. рис. 4, а), характеризующуюся только двумя параметрами ( $p_{\max}$  и  $T_p$ ), и при этом имеющую удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными [17].



**Рис.4.** Профили давлений  $P$  в ударной волне в простейшей треугольной аппроксимации:

$a$  – 2 неизвестных ( $p_{\max}, T_p$ );  $b$  – 3 неизвестных ( $p_{\max}, T_p, a$ );  $c$  – 4 неизвестных ( $p_{\max}, T_p, a, b$ );  $d$  – 5 неизвестных ( $p_{\max}, T_p, a, b, c$ )

**Вычисление собственных деформаций, вызванных с применением технологии ЛУВО (явная задача).** Для вычисления собственных деформаций, вызванных с применением технологии ЛУВО, решая явную задачу в LS-DYNA. Здесь решается задача распространения ударной волны в твердом материале со специфическим рассмотрением упруго-пластического поведения материала. При ЛУВО из-за воздействия большого по величине и кратковременного по времени давления скорости деформации в исследуемом материале достигают величин  $10^6 \text{ с}^{-1}$  и более, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния используется модель пластического деформирования материала Джонсона-Кука [1]:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left(1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^m\right) [1 - (T^*)^m], \quad (15)$$

где  $\sigma$  – 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:

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0), \quad (16)$$

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

Уравнение (20) 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. Модель Джонсона-Кука предполагает независимость относительного влияния деформационного упрочнения, скорости пластической деформации и повышения температуры при всех скоростях и температурах пластической деформации. В уравнении (15) выражение в первых скобках определяет напряжение как функцию деформации при  $\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1$  и  $T^* = 0$ , во вторых и третьих – влияние мгновенного значения скорости деформации и температуры на предел текучести, соответственно. Так как общепринято, что технология ЛУВО относится к



нетермическим технологиям, тепловыми эффектами игнорируем, и при моделировании будем использовать упрощенную модель Джонсона-Кука для комнатной температуры:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C\dot{\bar{\epsilon}}^*) . \quad (17)$$

В наших исследованиях расчеты проводятся (а также сравниваются с экспериментами) для титанового сплава ВТ-6. Его механические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Механические характеристики титанового сплава ВТ-6

Характеристика	Значение	Размерность
Плотность, $\rho$	4500	Кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,342	-
Модуль упругости, $E$	110	ГПа
Предел упругости Гюгонио, $\sigma_{HEL}$	2,8	ГПа
$A$	1098	МПа
$B$	1092	МПа
$C$	0,93	-
$n$	0,014	-

Большое количество элементов в конечноэлементной модели, особенно в явной задаче, ведет к очень долгим вычислительным процедурам. Однако эти вычислительные трудности могут быть легко преодолены при использовании моделирования собственных деформаций. Т.к. полные остаточные напряжения, вызванные технологией ЛУВО, геометрически независимы, рассматриваем только маленькую часть исследуемого образца с относительно простой геометрией, получив распределение полных остаточных напряжений по глубине. Имея такой профиль распределения, формулами (12) получаем собственные деформаций, вызванные с использованием ЛУВО ( $\epsilon_{ЛУВО,ij}^*$ ).

### Вычисление остаточных напряжений путем упругого моделирования (неявная задача).

После определения собственных деформаций ( $\epsilon_{ЛУВО,ij}^*$ ), вызванных с использованием технологии ЛУВО (шаг 1), они используются в качестве входа в упругом моделировании (шаг 2), что позволяет определять полные остаточные напряжения, вызванные ЛУВО для всего исследуемого образца, а не только для его участка с простой геометрией.

Полученные собственные деформаций вводятся как анизотропные коэффициенты теплового расширения  $\alpha_{ij}$ , путем ввода их в соответствующей подпрограмме ANSYS (16):

$$\alpha_{ij} = \epsilon_{ЛУВО,ij}^* . \quad (18)$$

Т.к.  $\alpha_{ij}$  включает в себя 6 независимых компонентов, процедура счета позволяет описать любые возможные состояния собственных деформаций. После этого запускается неявный решатель ANSYS с температурной вариацией  $\Delta T = 1$  и решается прямая термоупругая задача. Исследуемый образец упруго деформируется согласно (19)

$$\epsilon_{упр. ij} = \alpha_{ij}\Delta T . \quad (19)$$

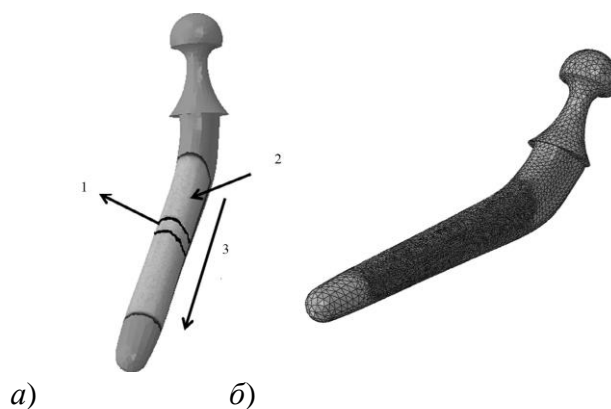
Перерасчетом по закону Гука получаем распределение ОН ( $\sigma_{ЛУВО}$ ) для всего образца на каждом шаге. В конечноэлементном анализе используются тетраэдральный элемент С3D4Т (линейными смещением и температурой), в узлах, которых вводятся температурные деформации.

Как было отмечено выше, собственные деформации – это смесь всех неупругих деформации различного происхождения без возможности их разделения на компоненты. Поэтому

представление при моделировании собственных деформаций в виде термических деформаций вполне корректно и дает те же результаты.

**Полученные результаты и их обсуждение. Остаточные напряжения, возникшие в тазобедренном суставе в результате обработки по технологии ЛУВО.** Рассмотрим процесс определения остаточных напряжений, возникшие в тазобедренном суставе со сложной геометрией в результате его обработки по технологии ЛУВО, используя метод собственных деформаций.

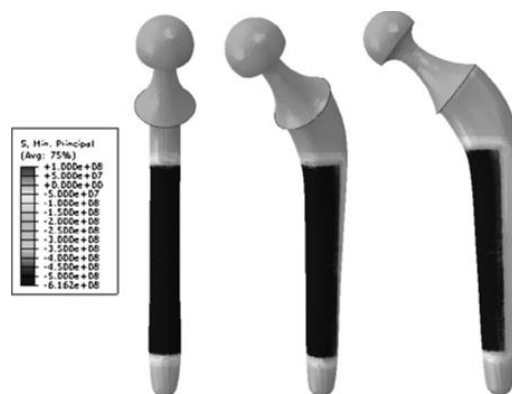
На рис. 5а представлен 3D-макет протеза тазобедренного сустава, созданного в САЕ-системе для дальнейшего конечноэлементного анализа. Стратегия численного моделирования заключается в следующем. На первом этапе, как было отмечено выше, решается явная задача в пакете LS-DYNA для малой части макета (участок 1 на рис. 5) длиной порядка 10 мм. Происходит обработка этой части по технологии ЛУВО, применяя лазерное воздействие со следующими параметрами: диаметр лазерного пятна - 1,5 мм, степень перекрытия лазерных пятен - 78 %. Такая высокая степень перекрытия лазерных пятен, как показывает накопленный опыт, уменьшает градиент поверхностных остаточных напряжений, обеспечивая их относительную однородность и сглаженный профиль. Получаем распределение собственных деформаций ( $\epsilon_{ЛУВО}^*$ ) для этого участка. На втором этапе происходит реконструкция собственных деформаций для всей области макета (участок 2 на рисунке 5) длиной 80 мм в конечноэлементной модели (рис. 5б), состоящей из 300240 конечных элементов типа C3D4T, импортируя сюда полученные на первом этапе собственные деформации ( $\epsilon_{ЛУВО}^*$ ). На третьем этапе в соответствующем решателе ANSYS решается неявная задача с определением полей остаточных напряжений.



**Рис.5.** Макет тазобедренного сустава:

*а) Уменьшенная (1) и целая (2) области макета тазобедренного сустава, 3 – направление сканирования; б) – конечноэлементная сетка ANSYS*

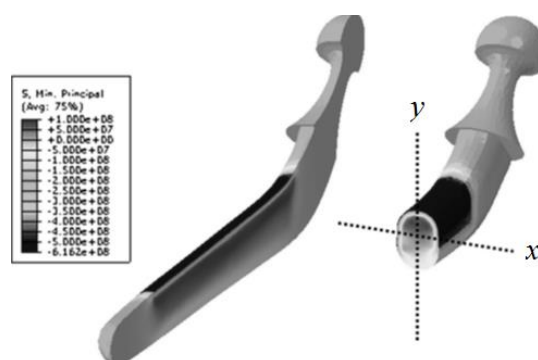
На рис.6 показаны главные минимальные поверхностные остаточные напряжения с разных точек зрения, что свидетельствует об однородном распределении поверхностных остаточных напряжений благодаря высокой степени перекрытия лазерных пятен. Как видим, сжимающие остаточные поверхностные напряжения больше чем 600 МПа по всей рассматриваемой поверхности. Представляет большой интерес установление общих закономерностей при применении технологии ЛУВО в материалах с криволинейной геометрией. В этом направлении были проведены специальные исследования на вогнутые и выпуклые формы образцов (в основном, с цилиндрической и сферической геометрией) и изучены особенности распространения ударных волн в таких средах.



**Рис.6.** Поверхностные остаточные напряжения, генерируемые в тазобедренном суставе при ЛУВО

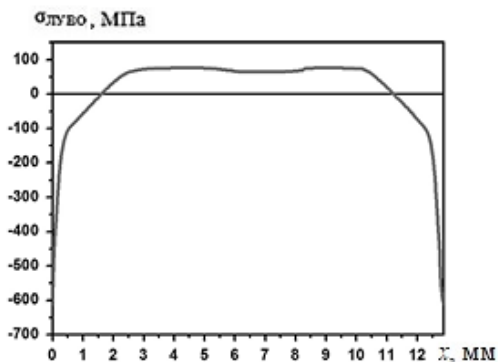
Результаты показывают [2-3], что существует почти линейная зависимость между кривизной материала и возникшими вследствие наличия кривизны дополнительными сжимающими остаточными напряжениями: наблюдается тенденция увеличения остаточных напряжений для вогнутых поверхностей и спад - для выпуклых поверхностей. Такая интересная взаимосвязь может быть объяснена из энергетических соображений, как следствие увеличения или уменьшения энергии пластической диссипации, возникающих в криволинейных геометриях по сравнению с плоскими геометриями.

К сожалению, экспериментальные измерения остаточных напряжений в образцах с криволинейной геометрией, а также на краях, не могут быть корректно выполнены. По этой причине численное моделирование является необходимым инструментом для учета краевого эффекта и эффекта кривизны. Для ответственных узлов, например, таких как биопротезы, крайне важно знание реального распределения остаточных напряжений перед началом их практической эксплуатации.



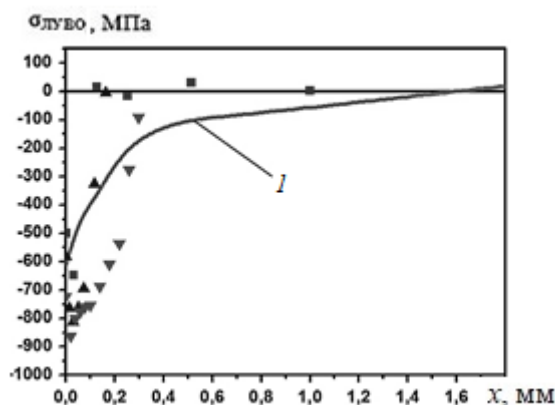
**Рис.7.** Внутренние остаточные напряжения в конечноэлементном макете тазобедренного сустава, вызванные технологией ЛУВО

На рис. 7 для удобства анализа закономерностей распределения внутренних остаточных напряжений показаны два различных сечения вдоль осей  $x$  и  $y$ . Результаты конечноэлементного анализа определяют глубину существования устойчивых сжимающих остаточных напряжений – порядка 1,64 мм (см. рисунок 8, где показан профиль распределения остаточных напряжений вдоль оси  $x$ ).



**Рис.8.** Распределение внутренних остаточных напряжений при ЛУВО вдоль оси  $x$

На рис. 9 показано сравнение между моделируемыми в настоящей работе остаточными напряжениями (по оси  $x$ ), генерируемыми при ЛУВО, и экспериментальными остаточными напряжениями, наведенными при использовании традиционной дробеструйной обработкой, широко используемой в настоящее время для обработки протезов тазобедренного сустава. Как видно, глубина СОН, созданные при использовании технологии ЛУВО, более чем в четыре раза больше чем при дробеструйной обработке. Это лишний раз доказывает, что технология ЛУВО создает гораздо более глубокие СОН, чем другие альтернативные технологий.



**Рис.9.** Сравнение между распределениями остаточных напряжений по глубине: созданными по технологии ЛУВО (линия 1) и различными экспериментальными данными (показаны треугольниками и квадратиками), полученными методом дробеструйной обработки (экспериментальные результаты взяты из [17])

**Выводы.** Была разработана численная конечноэлементная модель расчета полей остаточных напряжений, вызванных технологией лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) в тазобедренных суставах из титанового сплава ВТ-6. Модель реализует все физические процессы, протекающие при прохождении ударной волны в реальных трехмерных криволинейных объектах. Вычислительные трудности, возникающие в аналогичных задачах, были преодолены путем использования метода собственных деформаций. Были вычислены сжимающие остаточные напряжения (СОН), возникающие при ЛУВО в протезе тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ-6. Полученные результаты показали, что технология ЛУВО в протезах тазобедренного сустава может сгенерировать СОН, больше 600 МПа, при этом глубина залегания СОН – более 1,60 мм, что более чем в 4 раза больше, чем применяющейся в настоящее время с целью их упрочнения технология дробеструйной обработки. Полученные результаты, подтвержденные доступными в литературе экспериментальными результатами, показывают, что технология ЛУВО может быть успешно

применена для упрочнения протезов тазобедренных суставов с целью создания в них глубоких СОН, существенно повышая их прочность, долговечность, а также износо- и коррозионостойкость.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Бубнову М.А. за помощь в проведение расчетов в конечноэлементных пакетах LS-DYNA и ANSYS.

### Список литературы

1. Peyre P., Berthe L., Vignal V., Popa I., Baudin T. Analysis of laser shock waves and resulting surface deformations in an Al–Cu–Li aluminum alloy // *J. Phys. D Appl. Phys.* – 2012. – V.45. – P. 303-335.
2. Campioni I., Notarangelo G., Andreaus U., Ventura A., Giacomozzi C. Hip prosthesis computational modeling: FEM simulations integrated with fatigue mechanical tests, Biomechanics imaging and computational modeling in biomechanics // *Lecture notes in computational vision and biomechanics.* – 2013. – V. 4. – P. 81–109.
3. Senalp A.Z., Kayabasi O., Kurtaran H. Static, dynamic and fatigue behavior of newly designed stem shapes for hip prosthesis using finite element analysis // *Mater. Des.* – 2007. – V.28 (5). – P. 1577–1583.
4. Ocaña J.L., Morales M., Porro J.A., Díaz M., Ruiz L., Correa C. Induction of thermo-mechanical residual stresses in metallic materials by laser shock processing // *Encyclopedia Therm. Stresse.* – 2014. – P. 2427–2444.
5. Reissner H. Eigenspannungen und Eigenspannungsquellen // *Z. Angew. Math. Mech.* – 1931. – V. 11. – P. 1–8.
6. Mura T. *Micromechanics of Defects in Solids.* – 2nd ed. – Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. - 1991. – P. 587.
7. Лохов В.А., Туктамышев В.С. Исследование условий отсутствия механических напряжений в системах с собственными деформациями // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки.* – 2013. – № 2 (26). – С. 198–207.
8. 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. 195–204.
9. DeWald A.T., Hill M.R. Eigenstrain-based model for prediction of laser peening residual stresses in arbitrary three-dimensional bodies Part 1: model description // *J. Strain Anal. Eng. Des.* – 2009. – V.44. – P. 1–11.
10. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В. Лазерно-ударно-волновая обработка материалов при однократных и многократных импульсных воздействиях // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2015. – № 6. – С. 75-80.
11. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В., Киквидзе О.Г. Влияние эффекта перекрытия лазерных пятен на остаточные напряжения при лазерно-ударно-волновой обработке материалов // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2016. – № 3. – С. 77-84.
12. Сахвадзе Г.Ж., Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г. Исследование качества поверхностных слоев, упрочненных лазерно-ударно-волновой технологией при различных степенях перекрытия лазерных пятен // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* – 2016. – № 2. – С. 132-141.
13. 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.* – 2016. - № 7 (107). – С. 29-41. <http://www.vntr.ru/nomera/2016-7107/>
14. Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г. Особенности упрочнения материалов

- технологией лазерно-ударно-волновой обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. –2016. – № 9 (141). – С. 20-25.
15. Сахвадзе Г.Ж., Пугачев М.С., Киквидзе О.Г. Технология двухсторонней лазерно-ударно-волновой обработки материалов // Вестник машиностроения. –2016. – № 10. – С. 71-76.
  16. Achintha M., Nowell D. Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening // J. Mater. Process. Tech. – 2011. – V. 211 (6). – P.1091–1101.
  17. Xie L., Zhang J., Xiong C., Wu L., Jiang C., Lu W. Investigation on experiments and numerical modelling of the residual stress distribution in deformed surface layer of Ti-6Al-4V after shot peening // Mater. Des. – 2012. – V. 41. – P. 314-318.

*Дата поступления: 11 апреля 2018 г.*