

УДК 539.4: 539.214

doi 10.54708/19926502\_2024\_28210442

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАВЕДЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ГТД ПУТЕМ ДРОБЕСТРУЙНОГО НАКЛЕПА

А. Н. ЕРМОЛЕНКО\*, К. В. КОНЕВА

\* [ermolenko.an@ugatu.su](mailto:ermolenko.an@ugatu.su)

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

*Поступила в редакцию 17.04.2024*

**Аннотация.** Рассмотрены аспекты численного моделирования процесса дробеструйного наклепа, применяемого при наведении поверхностных остаточных напряжений в деталях газотурбинных двигателей (ГТД). Проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния представительного объема материала, подвергнутого воздействию дроби. Обсуждаются принципы сопоставления полученных численных решений с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** дробеструйный наклеп; остаточные напряжения; численное моделирование; ГТД; изотропное упрочнение; кинематическое упрочнение; модель Джонсона-Кука.

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях непрерывной борьбы за повышение ресурса и надежности деталей газотурбинных двигателей (ГТД) одним из наиболее перспективных направлений является наведение в них поверхностных остаточных напряжений. Дробеструйное упрочнение широко используется для создания приповерхностного слоя сжимающих остаточных напряжений. Данный метод поверхностного пластического деформирования используется для обработки лопаток ГТД, дисков компрессора и турбины, а также других деталей.

Исследования в области контроля распределения поверхностных остаточных напряжений проводят давно, но в настоящее время существует потребность в расчетных неразрушающих методиках определения остаточных напряжений в деталях сложных форм. Такие методики могут быть созданы с применением конечно-элементного моделирования, что позволяет учитывать большое число технологических параметров обработки (скорость, интенсивность потока, углы атаки и экспозицию обрабатываемых зон). Несмотря на преимущества применения численных методов, результаты расчетов могут иметь расхождение с экспериментальными данными, причиной этому может стать выбор модели материала. Поэтому в данной работе рассмотрено влияние различных математических моделей материала на характер и уровень распределения остаточных напряжений после соударения дробинок и поверхности плоской детали.

### ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для изучения процесса дробеструйной обработки авторами работ [1–3] было проведено большое количество экспериментальных исследований (метод Давиденкова, рентгеновский метод). Полученные экспериментальные данные применяют для разработки эмпирических моделей [4, 5] определения остаточных напряжений после упрочнения. Однако применение

экспериментального подхода требует нарушения целостности детали и сопряжено с большой трудоемкостью. Аналитические модели [6–8] включают в себя сложные математические расчеты, но основаны на большом числе допущений и применимы к деталям простых форм.

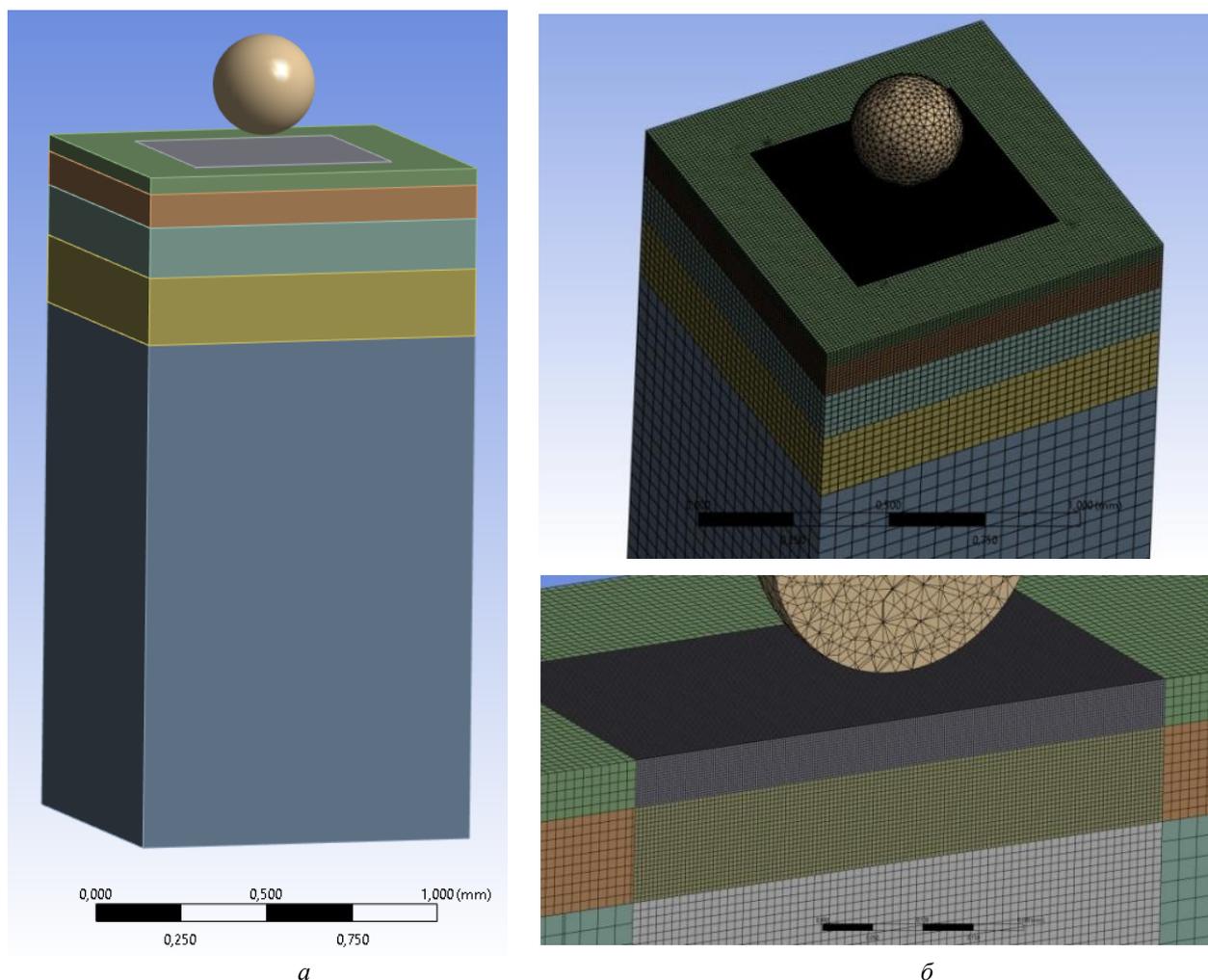
В настоящее время для прогнозирования и подбора режимов дробеструйного упрочнения широко применяют численные методы, одним из которых является метод конечных элементов (МКЭ) [9, 10].

### МОДЕЛЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Основываясь на опыте моделирования [11–14], когда пластины подвергались интенсивному воздействию дроби, было принято решение провести изолированный анализ воздействия одной дроби на представительный объем массивной детали, имитирующий объемную упрочняемую деталь ГТД, с целью изучения зоны распространения пластической деформации. На рис. 1, а представлена объемная модель геометрии, представляющая собой фрагмент пластины размерами  $1 \times 1$  мм, толщиной 2 мм. Дробь имеет сферическую форму диаметром 0,30 мм.

Геометрия детали была выполнена из 5 рядов пластин, уменьшающихся в толщине к месту удара дроби. Также 4 верхних слоя пластин имели разделение в радиальном направлении. Данная геометрия позволила зонировать размеры конечных элементов по уровням напряжений, полученных в предварительных численных экспериментах.

Решение задачи выполнено методом конечных элементов в объемной постановке. Конечно-элементная модель представлена на рис. 1, б. Сетка конечных элементов насчитывала до 1,7 млн. элементов.



**Рис. 1.** Объемные модели представительного объема:  
а – геометрия; б – общий вид сетки конечных элементов и с увеличением в сечении

Исходя из характера распределения и глубины залегания остаточных напряжений [15], когда наличие минимума сжимающих напряжений находится на глубине 40–60 мкм, толщина пластинки под местом удара дроби составляла  $5 \cdot 10^{-2}$  мм, а размер конечного 8-узлового элемента –  $2,5 \cdot 10^{-3}$  мм, толщина и размеры элементов в последующем слое –  $10 \cdot 10^{-2}$  мм и  $4,5 \cdot 10^{-3}$  мм соответственно.

Материал дроби – керамика, рассмотрен по идеально упругой модели материала Гука, с плотностью  $\rho = 3,10 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>, модулем упругости  $E = 4,0 \cdot 10^5$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,27$ . Процессы разрушения дроби в результате контактного взаимодействия не рассматривались.

Для решения задачи удара дроби по пластине был использован модуль *Explicit Dynamics* с решателем *Autodyna*. Начальная скорость дроби составляла  $8 \cdot 10^4$  мм/с. Фрагмент пластины был ограничен от перемещения в направлении удара с противоположной от точки контакта дроби с поверхностью стороны, а также от смещения в поперечных направлениях.

Высота падения дроби выбиралась исходя из минимизации времени расчета. В связи с этим расчетное время ограничивалось фактом значительной упругой разгрузки фрагмента пластины от воздействия дроби.

Во всех случаях в качестве исходного материала пластины был использован титановый сплав с плотностью  $\rho = 4,48 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>, модулем упругости  $E = 1,2 \cdot 10^5$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ , пределом текучести материала  $\sigma_T = 920$  МПа, тангенциальным модулем  $E_T = 775$  МПа.

Основываясь на существующих численных исследованиях процесса дробеструйной обработки, были выбраны три модели материала – с билинейным изотропным упрочнением, с кинематическим упрочнением и модель Джонсона–Кука.

#### МАТЕРИАЛ С ИЗОТРОПНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

В качестве опорной модели была выбрана простейшая модель материала с изотропным упрочнением. В данной модели материала билинейное изотропное упрочнение описывается зависимостью эффективных напряжений от эффективных деформаций, где начальный участок диаграммы описывается линейным модулем упругости материала  $E$ , а при достижении напряжениями начального значения предела текучести  $\sigma_T$  нагружение материала в области упруго-пластических деформаций реализуется через тангенциальный модуль  $E_T$ . При этом кривые деформирования после пластического деформирования вне зависимости от направления деформации сдвигаются по оси абсцисс, расширяя поверхность текучести во всех направлениях.

На рис. 2 показаны поля распределения нормальных напряжений  $\sigma_x$  после упругой разгрузки в поперечном сечении пластины и на ее поверхности.

На рис. 3 показаны поля распределения нормальных напряжений после упругой разгрузки в среднем поперечном сечении пластины по слоям, выделенным по ширине в проекции диаметра шарика дроби 0,3 мм. Сечения взяты таким образом, чтобы отобразить характерные зоны изменения напряжений. На первом графике показаны остаточные напряжения в слоях от поверхности 0 мм до уровня  $5,5 \cdot 10^{-2}$  мм, где наблюдается наибольшее по абсолютной величине значение сжимающих напряжений. На втором графике показаны слои от  $5,5 \cdot 10^{-2}$  мм до  $18,5 \cdot 10^{-2}$  мм, в которых происходит снижение влияния сжимающих остаточных напряжений.

Видно, что остаточные напряжения в поверхностных слоях достигают уровня  $0,1\sigma_{\max}$  растягивающих напряжений на расстоянии  $\sim 0,25$  мм от центра удара, что составляет  $1,67d_d$  от диаметра дроби. От поверхности до слоя, заглубленного приблизительно на  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мм, наблюдается резкий градиент между остаточными растягивающими и сжимающими напряжениями. При этом на поверхности наблюдается максимум растягивающих напряжений 466 МПа в центральной части, снижающийся до сжимающих –252 МПа на расстоянии  $3,75 \cdot 10^{-2}$  мм, соответствующем  $0,25d_d$  диаметра дроби. Данный минимум уходит глубже по слоям, сохраняя достаточное постоянство по расстоянию от центра при снижении величины сжимающих напряжений до –1190 МПа на глубине  $3,0 \cdot 10^{-2}$  мм. Наибольший

уровень сжимающих остаточных напряжений составляет  $-1295$  МПа. Локальный максимум напряжений, находящийся на линии удара дроби, сохраняется от поверхности, где имеются растягивающие напряжения, до глубины  $\sim 3,0 \cdot 10^{-2}$  мм и полностью исчезает ниже.

Диаметр отпечатка дроби составил  $1,13 \cdot 10^{-1}$  мм при глубине  $8,49 \cdot 10^{-3}$  мм.

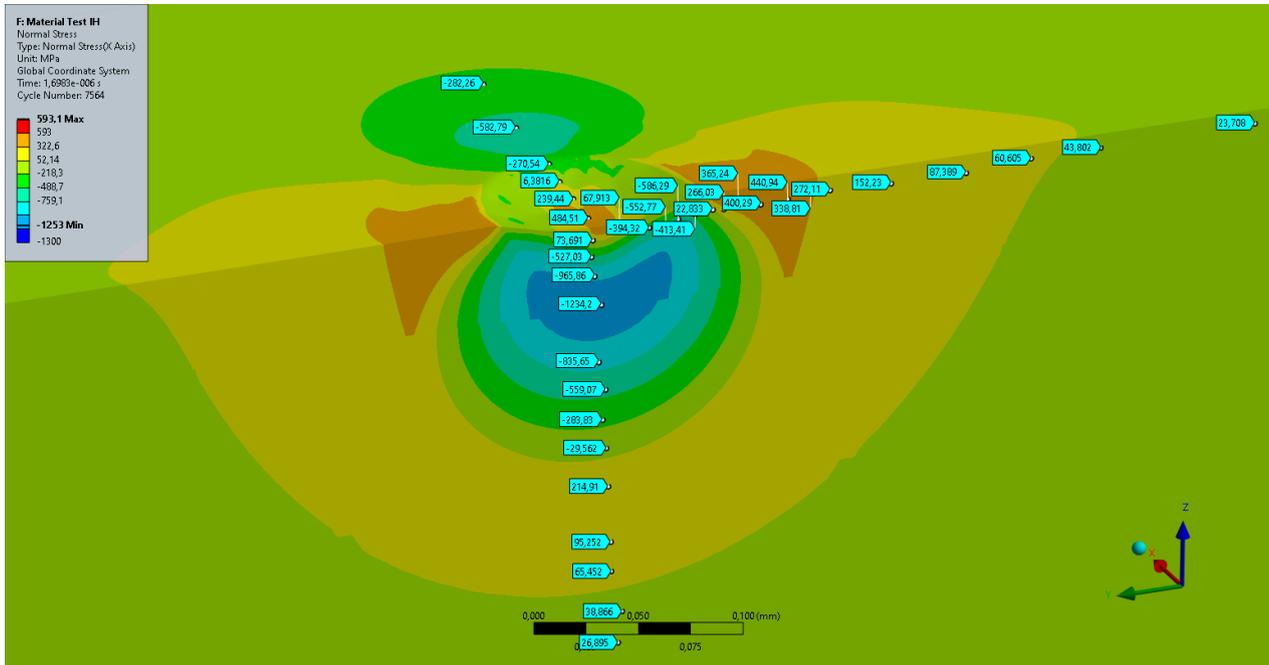


Рис. 2. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  при изотропном упрочнении

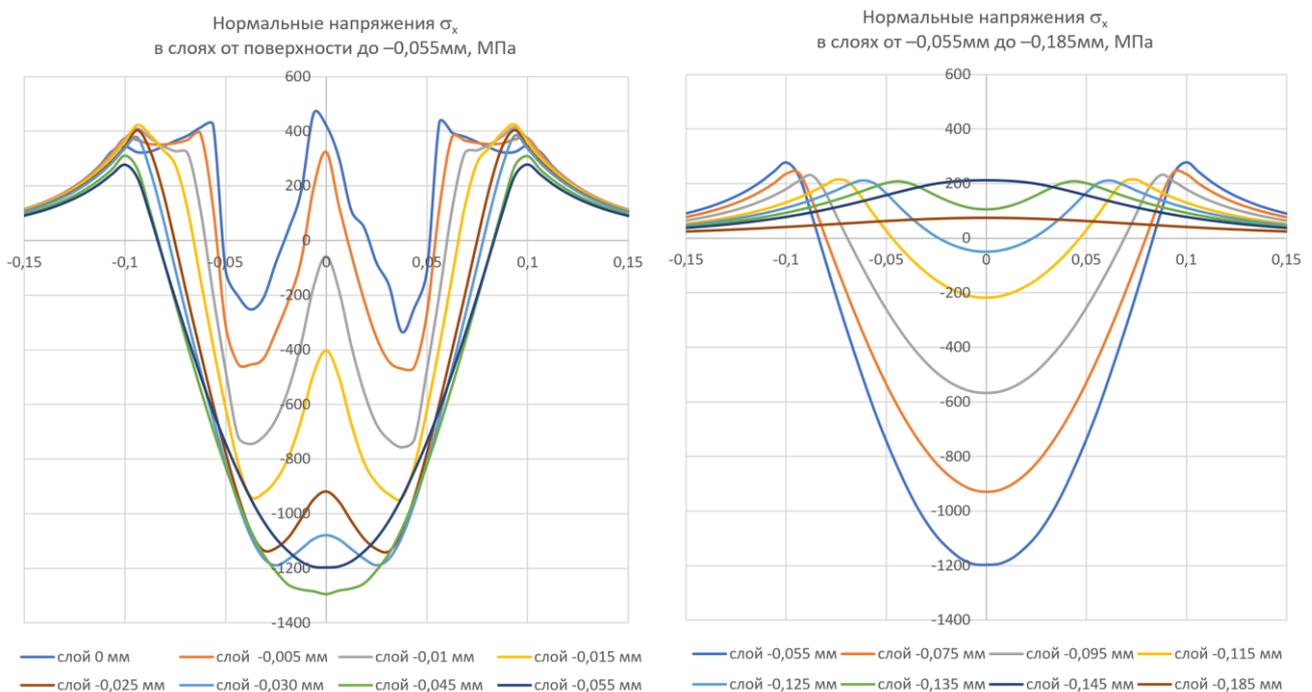


Рис. 3. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  по слоям детали

### МАТЕРИАЛ С КИНЕМАТИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

В модели материала с билинейным кинематическим упрочнением начальный наклон кривой деформирования описывается линейным модулем упругости материала  $E$ . По достижении предела текучести начинает развиваться пластическая деформация, при этом зависимость эффективных напряжений от полной деформации описывается тангенциальным

модулем  $E_T$ , по аналогии с изотропным упрочнением. Однако в данном случае учитывается, что упрочнение материала зависит от направления нагружения. При нагружении в противоположном направлении будет происходить снижение мгновенного предела текучести  $\sigma_T^- < \sigma_T^+$  при сохранении удвоенного исходного значения предела текучести  $\sigma_T^- + \sigma_T^+ = 2\sigma_{T_0}^+$  (где  $2\sigma_{T_0}^+$  – начальное значение предела текучести при растяжении). Таким образом, кривые деформирования имеют участки упрочнения, лежащие на линиях упрочнения первоначального деформирования, сдвигая поверхность текучести в направлении деформации.

На рис. 4 показаны поля распределения нормальных напряжений после упругой разгрузки в поперечном сечении пластины и на ее поверхности.

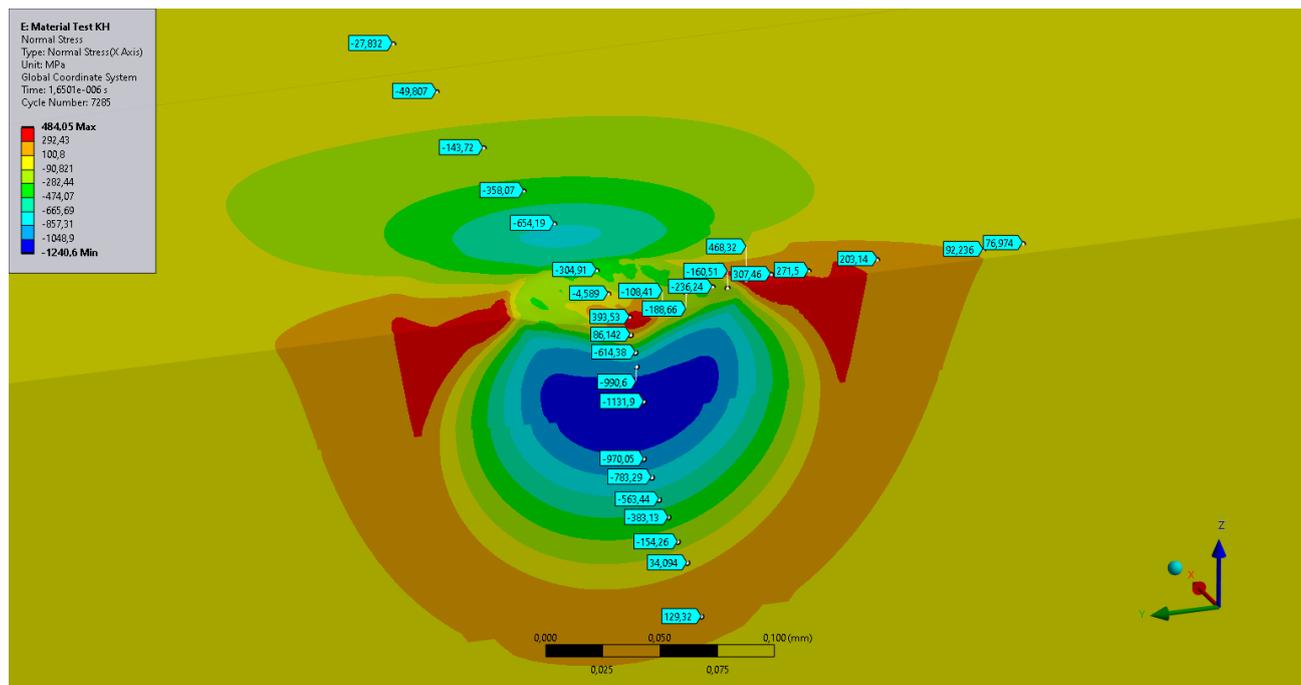


Рис. 4. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  при кинематическом упрочнении

На рис. 5 показаны поля распределения нормальных напряжений  $\sigma_x$  после упругой разгрузки в среднем поперечном сечении пластины по слоям, выделенным по ширине в проекции диаметра шарика дроби 0,3 мм. Сечения взяты таким образом, чтобы отобразить характерные зоны изменения напряжений. На первом графике показаны остаточные напряжения в слоях от поверхности 0 мм до уровня  $5,4 \cdot 10^{-2}$  мм, где наблюдается наибольшее по абсолютной величине значение сжимающих напряжений. На втором графике показаны слои от  $5,4 \cdot 10^{-2}$  мм до  $18,3 \cdot 10^{-2}$  мм, в которых происходит снижение влияния сжимающих остаточных напряжений.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях достигают уровня  $0,1\sigma_{\max}$  растягивающих напряжений на расстоянии  $\sim 0,24$  мм от центра удара, что составляет  $1,61d_d$  от диаметра дроби. На поверхности наблюдается максимум растягивающих напряжений 409 МПа в центральной части, снижающийся до сжимающих  $-1225$  МПа на расстоянии  $5,40 \cdot 10^{-2}$  мм, соответствующем  $0,18d_d$  диаметра дроби. Видно, что в случае модели материала с кинематическим упрочнением заметно сужение зоны распространения остаточных напряжений в диаметральном направлении и уменьшение уровня наибольших сжимающих напряжений в центре на оси удара дроби, а также увеличение глубины залегания данных напряжений.

Диаметр отпечатка дроби составил  $1,20 \cdot 10^{-1}$  мм при глубине  $8,59 \cdot 10^{-3}$  мм. Полученные значения, в свою очередь, также демонстрируют рост в сравнении с моделью материала с изотропным упрочнением.

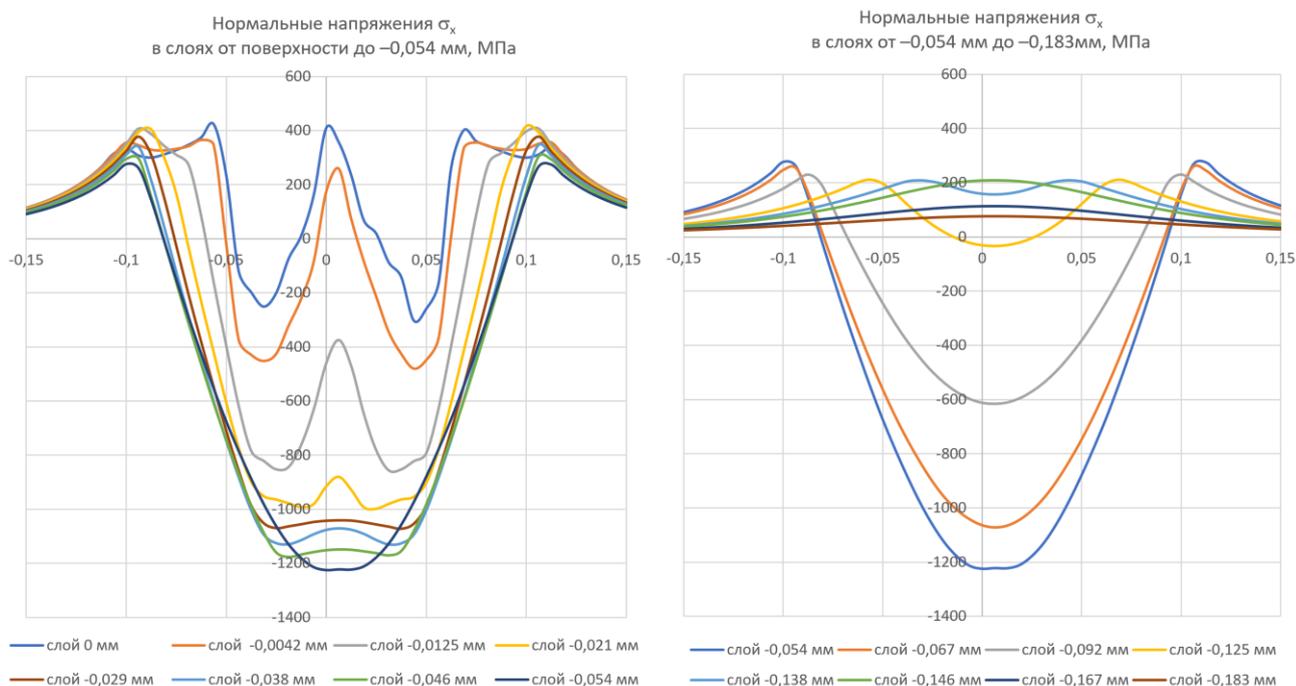


Рис. 5. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  по слоям детали

### МОДЕЛЬ МАТЕРИАЛА ДЖОНСОНА–КУКА

Модель материала Джонсона–Кука [16] описывает процесс пластической деформации и разрушения с учетом высоких скоростей деформирования в процессе динамического нагружения, а также присущего этим процессам адиабатического разогрева материала. Напряжения течения Мизеса в данной модели реализованы в форме:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_{pl}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{pl}^*) (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где  $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ ,  $T$  – текущее значение температуры;  $T_0$  – комнатная температура;  $T_m$  – температура плавления материала;  $A$  – опорное значение предела текучести при комнатной температуре и малых скоростях деформаций;  $\dot{\varepsilon}_{pl}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}$  – относительная скорость пластической деформации, опорное значение скорости пластической деформации, обычно принимаемое  $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $B$  и  $n$  – константы упрочнения материала;  $C$  – константа, учитывающая скоростное упрочнение материала;  $m$  – степень температурного разупрочнения материала.

Помимо основных упругих и механических характеристик, которые являлись общими для всех моделей материалов, в модели Джонсона–Кука были заданы следующие значения констант: константа упрочнения  $B = 509,75$  МПа, степень упрочнения  $n = 0,506$ , константа скорости деформации  $C = 0,03$ , температура плавления  $T_m = 1668$  °С, базовый показатель скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}$ , удельная теплоемкость  $500 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ , степень температурного разупрочнения  $m = 1$ .

В рамках рассматриваемой модели предполагалось, что разогрев детали не происходит из-за существенно более интенсивного отвода тепла через обрабатываемую деталь и жидкостно-воздушного охлаждения от потока дроби со вспомогательными средствами, обеспечивающими технологический процесс дробеструйной обработки.

На рис. 6 показаны поля распределения нормальных напряжений после упругой разгрузки в поперечном сечении пластины и на ее поверхности.

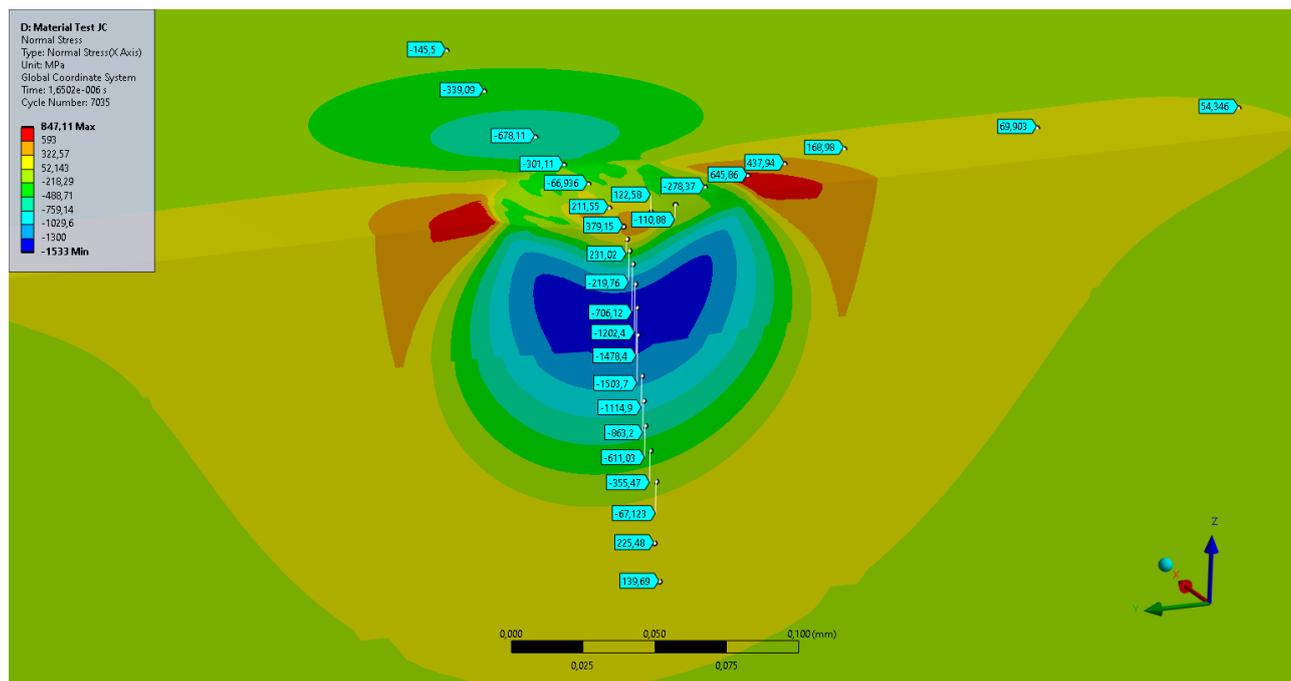


Рис. 6. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  по модели материала Джонсона–Кука

На рис. 7 показаны поля распределения нормальных напряжений после упругой разгрузки в среднем поперечном сечении пластины по слоям, выделенным по ширине в проекции диаметра шарика дробы 0,3 мм. Сечения взяты таким образом, чтобы отобразить характерные зоны изменения напряжений. На первом графике показаны остаточные напряжения в слоях от поверхности 0 мм до уровня  $4,2 \cdot 10^{-2}$  мм, где наблюдается наибольшее по абсолютной величине значение сжимающих напряжений. На втором графике показаны слои от  $4,2 \cdot 10^{-2}$  мм до  $18,3 \cdot 10^{-2}$  мм, в которых происходит снижение влияния сжимающих остаточных напряжений.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях достигают уровня  $0,1\sigma_{\max}$  растягивающих напряжений на расстоянии  $\sim 0,22$  мм от центра удара, что составляет  $1,44d_d$  от диаметра дробы. По данному критерию модель материала демонстрирует наименьшее распространение растягивающих напряжений в радиальном направлении от оси удара в сравнении с материалами с изотропным и кинематическим упрочнением. От поверхности до слоя, заглубленного приблизительно на  $0,9 \cdot 10^{-2}$  мм, наблюдается резкий градиент между остаточными растягивающими и сжимающими напряжениями. При этом на поверхности наблюдается максимум растягивающих напряжений 398 МПа в центральной части, снижающийся до сжимающих  $-1476$  МПа на расстоянии  $2,9 \cdot 10^{-2}$  мм, соответствующем  $0,09d_d$  диаметра дробы. По данному показателю модель Джонсона–Кука также демонстрирует снижение зоны распространения остаточных напряжений вглубь исследуемого объема детали. Данный минимум уходит глубже по слоям, сохраняя достаточное постоянство по расстоянию от центра при снижении величины сжимающих напряжений до  $-1540$  МПа на глубине  $4,2 \cdot 10^{-2}$  мм. Абсолютный максимум сжимающих напряжений оказывается больше на 26% в сравнении с материалом с кинематическим упрочнением и на 19% – с изотропным.

Диаметр отпечатка составил  $1,08 \cdot 10^{-1}$  мм при глубине  $6,97 \cdot 10^{-3}$  мм, что является наименьшими значениями деформаций в сравниваемой тройке моделей материалов.

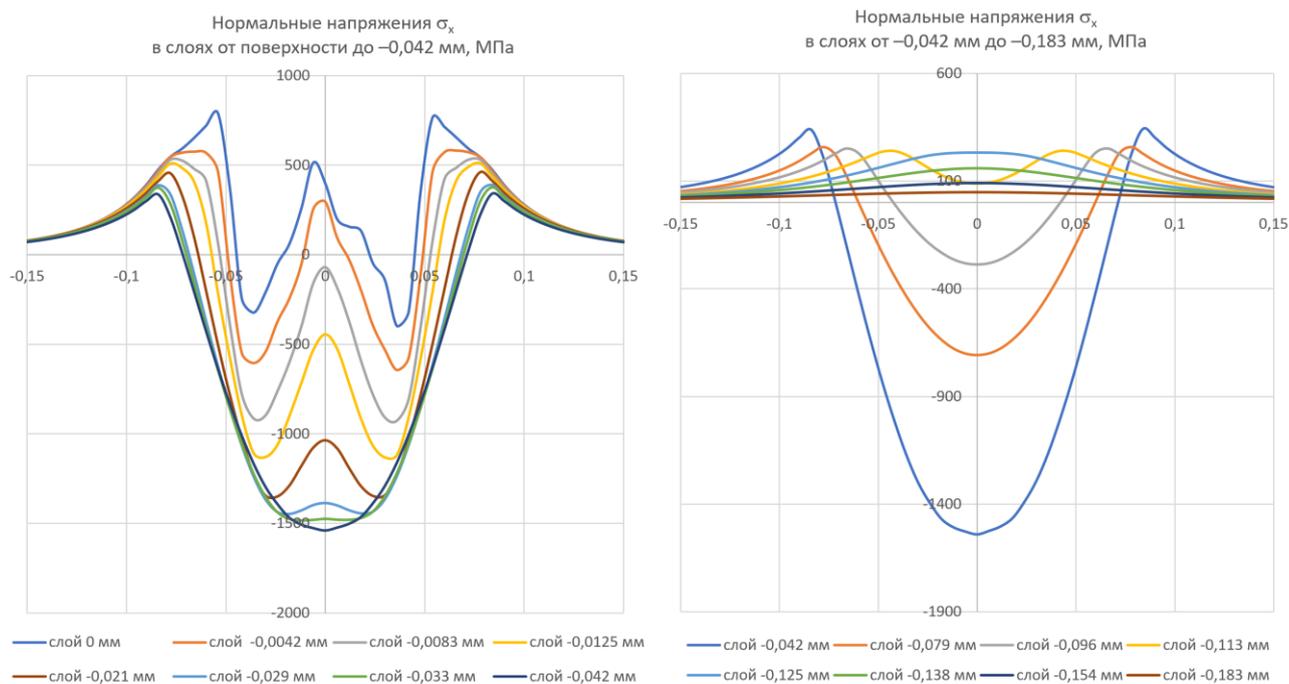


Рис. 7. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  по слоям детали

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основным макрокритерием для сравнения полученных результатов численных экспериментов является конфигурация деформированной зоны в месте удара дроби. Методики определения остаточных напряжений базируются на параметрах твердости материала, диаметра отпечатка дроби и глубины отпечатка. Сравнение этих параметров деформированного состояния приведено в табл. 1. Видно, что наименьший диаметр отпечатка соответствует модели материала Джонсона–Кука, а наибольший – модели с кинематическим упрочнением. Указанная особенность может быть объяснена различиями в процессе упругопластической разгрузки материала, в результате которой в модели Джонсона–Кука наблюдается больший упругий возврат и формирование более высоких остаточных приповерхностных сжимающих напряжений.

Таблица 1

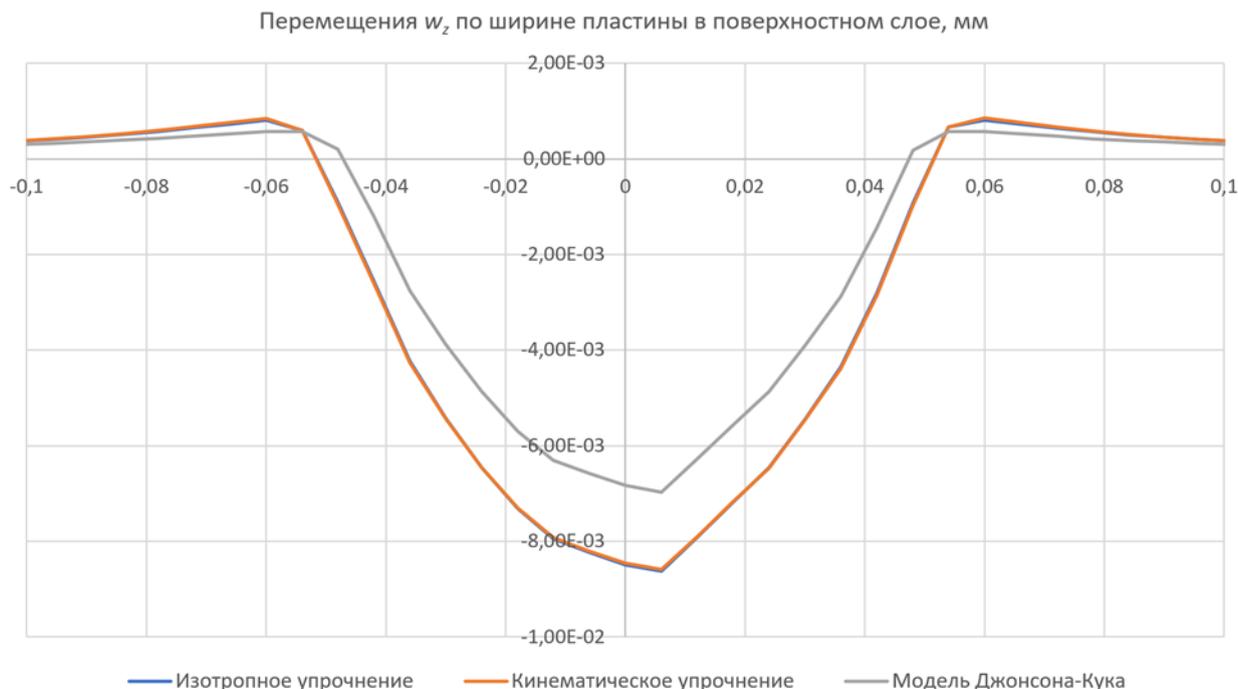
Деформации в зоне удара дроби

|                                 | Модель материала      |                           |              |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
|                                 | Изотропное упрочнение | Кинематическое упрочнение | Джонсон–Кука |
| Диаметр отпечатка, $10^{-1}$ мм | 1,13                  | 1,20                      | 1,08         |
| Глубина отпечатка, $10^{-1}$ мм | 8,49                  | 8,59                      | 6,97         |

Аналогичную тенденцию демонстрирует и глубина отпечатка (рис. 8). Отличия в перемещениях в направлении удара дроби в случае моделей материалов с изотропным и кинематическим упрочнением невелики и составляют в среднем 2,6 % в основной зоне сферического отпечатка дроби. В свою очередь модель Джонсона–Кука демонстрирует существенное отличие в глубине отпечатка, которая оказывается на 19 % меньше, чем у сравниваемых моделей материалов.

Распределение остаточных нормальных напряжений необходимо оценивать как в радиальном от оси удара дроби направлении, так и в направлении удара. В первом случае зона влияния остаточных напряжений дает возможность оценить необходимые размеры представительного объема при переходе от модели элементарного воздействия дроби

к оценке интегрального значения остаточных напряжений на макроуровне. Увеличение данной зоны в деталях сложной формы (перо и хвостовик лопатки, пазы дисков, галтельные переходы валов) будет существенно зависеть от жесткостей, прилегающих к месту дробеструйного наклепа объемов. Дополнительный уровень остаточных напряжений в детали по сравнению с тестовыми пластинами формируется, в том числе за счет снижения упругой разгрузки, что в свою очередь может быть эквивалентно остаточным напряжениям в тестовых пластинах, подвергнутых дробеструйному наклепу и не демонтированных из оснастки, которая придает им прямолинейное положение в процессе обработки.



**Рис. 8.** Распределение деформаций в направлении удара дроби в поверхностном слое

Одной из характерных зон распределения напряжений является ось линии удара дроби. На рис. 9 показано сравнение распределений остаточных напряжений по глубине для трех моделей материала.

Модель материала Джонсона–Кука демонстрирует большую величину абсолютного значения остаточных сжимающих напряжений, составляющую  $-1540$  МПа на глубине около  $5,5 \cdot 10^{-2}$  мм, в то время как материалы с изотропным и кинематическим упрочнением демонстрируют уровни напряжений в  $-1295$  и  $-1225$  МПа соответственно на глубинах около  $4,5 \cdot 10^{-2}$  мм.

В поверхностном слое, в зоне, удаленной на  $\sim 1,8 \cdot 10^{-2}$  мм от оси ударного воздействия дроби, возникают поверхностные растягивающие напряжения, достигающие  $400$  МПа. Однако данный пик достаточно быстро убывает в область сжимающих напряжений на расстоянии около  $0,9 \cdot 10^{-2}$  мм от поверхности.

Залегание наибольших сжимающих остаточных напряжений на минимальной глубине около  $4,5 \cdot 10^{-2}$  мм (15 % от диаметра дроби) наблюдается в моделях материала Джонсона–Кука и с изотропным упрочнением. В свою очередь материал с кинематическим упрочнением демонстрирует большую глубину воздействия наклепа, в нем минимум остаточных напряжений находится на уровне  $5,5 \cdot 10^{-2}$  мм, что составляет 18 % от диаметра дроби.

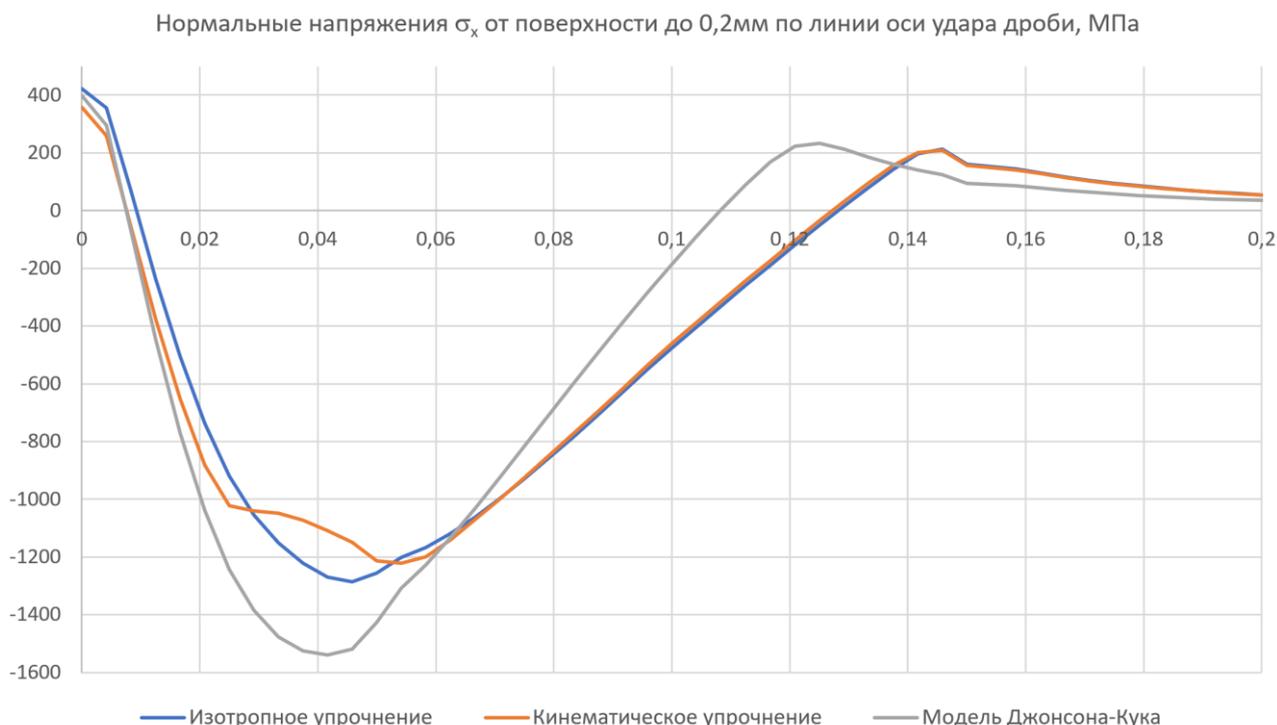


Рис. 9. Распределение нормальных остаточных напряжений  $\sigma_x$  по оси линии удара дроби

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного исследования напряженно-деформированного состояния в области контактного взаимодействия дроби и упрочняемой поверхности объемной детали ГТД установлено, что наименьшие значения остаточных деформаций в зоне отпечатка дроби в детали соответствуют материалу Джонсона–Кука, в то время как наибольшее значение соответствует материалу с кинематическим упрочнением.

Установлено, что глубина вдавленного поверхностного слоя также будет больше в случае использования материалов с изотропным и кинематическим упрочнением, в случае использования модели Джонсона–Кука она оказывается на 19 % меньше.

Выявлено, что в поверхностном слое, в зоне, соответствующей ~6 % диаметра дроби от оси ударного воздействия, формируются поверхностные растягивающие напряжения, быстро убывающие в область сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое, находящемся на расстоянии 3 % от диаметра дроби от поверхности.

Наименьшая глубина слоя, в котором абсолютное значение сжимающих остаточных напряжений достигает максимума, соответствует модели материала Джонсона–Кука и материалу с изотропным упрочнением ( $\sim 4,5 \cdot 10^{-2}$  мм в обоих случаях), в то время как наибольшая глубина – материалу с кинематическим упрочнением ( $\sim 5,5 \cdot 10^{-2}$  мм).

Наибольший уровень сжимающих остаточных напряжений, достигнутый от удара дроби, получен с использованием модели материала Джонсона–Кука (–1540 МПа), наименьший – в материале с кинематическим упрочнением (–1225 МПа), а в случае изотропного упрочнения составляет –1295 МПа.

Установленные особенности напряженно-деформированного состояния позволяют провести сопоставление с экспериментальными данными, полученными при дробеструйном наклепе с низкими концентрациями дроби. Сопоставление средних значений диаметров отдельно расположенных отпечатков позволит подобрать наиболее корректный вариант модели материала, соответствующий заданному виду дробеструйной обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биргер И. А.** Остаточные напряжения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 232 с. [I.A. Birger, Residual Stresses. Moscow: State Scientific and Technical Publisher of Mechanical Engineering Literature, 1963. 232 p. (in Russian).]
2. **Крень А. П., Делендик М. Н., Мацулевич О. В., Гусев О. К., Пантелеев К. В., Воробей Р. И.** Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряженного состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании // Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14. № 2, С. 115-125. [A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev, K.U. Pantsialeyeu, R.I. Vorobey, X-ray diffraction method in the study of a metal surface stress state under static and impact deformation // Devices and Methods of Measurements. 2023. Vol. 14, No. 2, P. 115-125 (in Russian).]
3. **Саверин М.М.** Дробеструйный наклеп. М.: Mashgiz, 1955. 312 с. [M.M. Saverin, Shot Peening. Moscow: Mashgiz, 1955. 312 p. (in Russian).]
4. **Келлер И. Э., Трофимов В. Н., Владыкин А. В., Плюснин В. В., Петухов Д. С., Виндокуров И. В.** К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2018. Т. 22, № 1. С. 40-64. [I.E. Keller, V.N. Trofimov, A.V. Vladykin, V.V. Plusnin, D.S. Petukhov, I.V. Vindokurov, On the reconstruction of residual stresses and strains of a plate after shot peening // Vest. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki. 2018. Vol. 22, No. 1. P. 40-64 (in Russian).]
5. **Никонова Т. Ю., Жунуспеков Д. С., Ясаков Ю. Д.** Эмпирико-математическая модель обработки штока гидроцилиндра струйно-абразивным методом // Наука и техника Казахстана. 2023. № 3. С. 57-70. [T.Yu. Nikonova, D.S. Zhunuspekov, Yu.D. Yassakov, Empirical-mathematical model of hydraulic cylinder rod processing by jet-abrasive method // Science and Technology of Kazakhstan. 2023. No. 3. P. 57-70 (in Russian).]
6. **Лебеденко В. Г.** Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2008. Т. 8, № 4 (39). С. 202-212. [V.G. Lebedenko, The mathematical description of process of formation of geometrical parameters of the superficial layer and hardening at processing details in fraction // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2008. Vol. 8, No. 4 (39). P. 202-212 (in Russian).]
7. **Колмогоров Г. Л., Высотин А. С.** Применение механики пластин для оценки эффективности упрочняющей дробеструйной обработки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14, № 6. С. 475-480. [G.L. Kolmogorov, A.S. Vysotin, Application of plate mechanics to evaluate the effectiveness of reinforcing shot blasting // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2018. Vol. 14, No. 6. P. 475-480 (in Russian).]
8. **Донсков А.С., Прохоров А.В.** Математическая модель остаточных напряжений, формирующихся при дробеструйной обработке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12, № 3. С. 69-76. [A.S. Donskov, A.V. Prokhorov, Mathematical model of residual stresses forming during shot peening // Bulletin of Perm National Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science. 2010. Vol. 12, No. 3. P. 69-76 (in Russian).]
9. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. 540 с. [O. Zenkevich, Finite Element Method. Moscow: Mir, 1975. 540 p. (in Russian).]
10. **Букатый А. С., Евдокимов Д. В., Бычков Д. А., Marwan S., Сараев А. С.** Расчетное прогнозирование технологических остаточных деформаций при изготовлении деталей, подвергаемых упрочнению поверхностным пластическим деформированием // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т. 25, № 3 (113), 2023, с. 72-76. [A.S. Bukaty, D.V. Evdokimov, D.A. Bychkov, S. Marwan, A.S. Saraev, Technological residual deformations calculating for aviation parts subjected to shot peening strengthening // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vol. 25, No. 3 (113), 2023, p. 72-76 (in Russian).]
11. **Qi Yang, Wenlong Zhou, et al.** Investigation on the fretting fatigue behaviors of Ti-6Al-4V dovetail joint specimens treated with shot-peening // Wear 372-373 (2017), pp. 81–90.
12. **Киселёв И.А., Жуков Н.А., Васильев Б.Е., Селиванов А.Н.** Учет остаточных напряжений при расчетах прочности элементов замковых соединений. Часть 1. Моделирование дробеструйной обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 11. С. 49-59. [I.A. Kiselev, N.A. Zhukov, B.E. Vasilyev, A.N. Selivanov, Modeling of residual stresses when calculating strength of lock joint elements. Part 1. Modeling of the shot peening process // Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 2018. No. 11. P. 49-59 (in Russian).]
13. **Букатый А. С., Костичев В. Э., Денискина Е. А.** Динамический метод исследования концентраторов напряжений колленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 с учетом упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 3 (41), ч. 2, с. 40-45. [A. S. Bukaty, V. E. Kostichev, E. A. Deniskina, Dynamic method of investigating stress concentrators of the YMZ-238 engine crankshaft considering surface hardening plastic deformation // Vestnik of Samara State Aerospace University. 2013. No. 3 (41), part 2, p. 40-45 (in Russian).]
14. **M. Daoud, R. Kubler, A. Bemo.** Prediction of residual stress fields after shot-peening of TRIP780 steel with second-order and artificial neural network models based on multi-impact finite element simulations // Journal of Manufacturing Processes 72 (2021). P. 529-543.
15. **В. Э. Костичев, В. А. Кирпичев, Ю. П. Ковалкин, П. А. Шляпников.** Использование динамического моделирования для исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов после дробеструйной обработки // Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием / Математическое моделирование

и краевые задачи (27–30 мая 2019 г., Самара, Россия). Самара: СамГТУ, 2019. С. 69-71. [V.E. Kostichev, V.A. Kirpichev, Yu.P. Kovalkin, P.A. Shlyarnikov, Use of dynamic modeling for the study of the stress-strain state of cylindrical samples after shot peening // Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference “Mathematical Modeling and Boundary Value Problems (27–30 May 2019, Samara, Russia). Samara: Samara State Technical University, 2019. P. 69-71 (in Russian).]

16. Бузюркин А. Е., Гладкий И. Л., Краус Е. И. Определение параметров модели Джонсона–Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 2, с. 188-195. [A. E. Buzyurkin, I. L. Gladky, E. I. Kraus, Determination of parameters of the Johnson–Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys // Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika. 2015. Vol. 56, No. 2, p. 188-195 (in Russian).]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЕРМОЛЕНКО Анатолий Николаевич**, к.т.н., доц. каф. сопротивления материалов, Уфимский университет науки и технологий.

**КОНЕВА Ксения Владимировна**, аспирант, инженер кафедры СМ, Уфимский университет науки и технологий. ksyu.koneva.95@mail.ru.

#### METADATA

**Title:** Comparative analysis of material models during the inducing of residual stresses in GTE parts by shot peening.

**Authors:** A. N. Ermolenko <sup>1</sup>, K. V. Koneva <sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia

**Email:** <sup>1</sup> ermolenko.an@ugatu.su, <sup>2</sup> ksyu.koneva.95@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 2 (104), pp. 42-53, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Aspects of finite element modeling of the shot peening process used to induce surface residual stresses in parts of gas turbine engines (GTEs) were considered. A comparative analysis of the stress-strain state of a representative volume of material exposed to shot was carried out. The principles of comparing the obtained numerical solutions with experimental data are discussed.

**Keywords:** shot peening; residual stresses; finite element modeling; GTE; isotropic hardening; kinematic hardening; Johnson-Cook model.

#### About authors:

**ERMOLENKO, Anatoly Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of the Strength of Materials.

**KONEVA, Ksenia Vladimirovna**, postgraduate student, engineer at the Department of the Strength of Materials.