

УДК 62-253:539.4:539.214

doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-49-59

Учет остаточных напряжений при расчетах прочности элементов замковых соединений. Часть 1. Моделирование дробеструйной обработки

И.А. Кисёлев¹, Н.А. Жуков¹, Б.Е. Васильев¹, А.Н. Селиванов²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова

Modeling of Residual Stresses when Calculating Strength of Lock Joint Elements. Part 1. Modeling of the Shot Peening Process

I.A. Kiselev¹, N.A. Zhukov¹, B.E. Vasilyev¹, A.N. Selivanov²¹ Bauman Moscow State Technical University² Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM

Для увеличения ресурса ответственных деталей современных газотурбинных двигателей и установок наземного применения используют упрочняющую дробеструйную обработку. В настоящее время выбор рациональных режимов дробеструйной обработки осуществляется на основе эмпирических методов. В данной статье, представленной в двух частях, предложена расчетная методика оценки влияния режима дробеструйного упрочнения на напряженно-деформированное состояние элементов замковых соединений при их эксплуатации. В первой части статьи приведено описание разработанного метода расчета поля остаточных напряжений и наклепа, наведенных в ходе дробеструйной обработки, на основе конечно-элементного моделирования последовательного внедрения микрошариков на малом участке упрочняемого материала в упругопластической постановке. Особенностью метода является универсальность по отношению к технологическим параметрам обработки и свойствам упрочняемой детали: структура метода обеспечивает автоматическую реконфигурацию расчетной конечно-элементной модели в зависимости от исходных данных. С помощью предложенного подхода получены эпюры компонент остаточных напряжений и эквивалентной пластической деформации. Представлены результаты расчета поля остаточных напряжений, наведенных в процессе дробеструйной обработки, в поверхностном слое детали из никелевого сплава. Проведен анализ влияния режимов дробеструйного упрочнения на эпюры компонент остаточных напряжений и наклепа. Результаты моделирования поля остаточных напряжений с использованием предложенного метода могут быть применены для задания начального напряженно-деформированного состояния при анализе статической и усталостной прочности деталей газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: остаточные напряжения, дробеструйное упрочнение, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние

Shot peening is used to increase life of crucial parts of modern gas turbine engines and ground-based industrial engines. Currently, rational shot peening parameters are selected based on empiric methods. In this work, presented in two parts, a computational technique for evaluating the influence of shot peening parameters on the stress-strain state of lock joint elements is presented. The first part describes the developed technique for calculating the

residual stress and plastic strain fields induced by shot peening. The technique is based on finite element modeling of the impact created by a series of micro-shots in a small area of the hardened material in the elastic-plastic formulation. A specific feature of the method is its versatility in relation to the processing parameters and properties of the workpiece. The method is structured so as to provide automatic reconfiguration of the calculated finite element model depending on the initial data. Using the proposed approach, diagrams of components of the residual stresses and equivalent plastic deformation are plotted. The results of calculating the residual stress field induced by shot peening in the surface layer of a nickel alloy part are presented. An analysis of the influence of shot peening parameters on the obtained diagrams of components of the residual stress and plastic strain is conducted. The results of residual stress field modeling based on the proposed method can be used for setting an initial strain-stress state when analyzing static and fatigue strength of gas turbine parts.

Keywords: residual stresses, shot peening, finite element method, stress-strain state

Для увеличения ресурса деталей современных газотурбинных двигателей используют упрочняющую дробеструйную обработку (ДСО), заключающуюся в ударном воздействии на поверхность детали металлическими или стеклянными частицами дроби малых размеров (сферическими объектами диаметром до 1 мм) с большой скоростью (до 100 м/с). В результате обработки в приповерхностном пластически деформированном слое детали формируется поле сжимающих остаточных напряжений (ОН), приводящее к замедлению роста усталостных трещин и, как следствие, к увеличению циклической долговечности, малоциклового усталости, повышению эрозионной и коррозионной стойкости [1].

Важной проблемой при ДСО является контроль эпюр наведенных ОН. Изначально для этого использовали методику, предложенную Дж.О. Алменом (J.O. Almen) [2]: стальные пластины регламентированных размеров закрепляли в зоне обработки дробью. Измеренное значение прогиба, вызванного наведенным полем сжимающих ОН, снятое с системы крепления пластины, служило мерой интенсивности обработки.

Целью настоящей работы являлась разработка метода моделирования ДСО и поля наведенных ОН, позволяющего назначать технологические параметры обработки, оптимальные с точки зрения усталостной прочности упрочняемой детали. Исследование поля ОН, наведенных в детали при ДСО, первоначально проводили экспериментальными методами: П.С. Привы (P.S. Prevey) [3] и А. Эзейло (A. Ezeilo) [4] определяли эпюру ОН вдоль глубины приповерхностного слоя детали для никелевых сплавов с использованием метода дифракции рентгеновских лучей. Первые расчетные исследова-

ния напряженно-деформированного состояния (НДС) детали после обработки были выполнены с применением аналитических моделей внедрения жесткого сферического индентора в упруго-пластическую полуплоскость в квазистатической [5] и динамической [6] постановках.

Среди численных подходов к моделированию процесса ДСО с использованием метода конечных элементов можно выделить две основные группы. В моделях первой группы отказываются от прямого рассмотрения контактного взаимодействия между дробью и поверхностью и заменяют его на приложение к детали эквивалентной кинематической [7] или силовой [8, 9] нагрузки, зависящей от времени. Достоинством таких моделей является малая вычислительная емкость, недостатком — потребность в предварительной численной и экспериментальной калибровке при изменении технологических параметров ДСО.

Подходы второй группы базируются на проведении конечно-элементного (КЭ) моделирования соударения частиц дроби с поверхностью детали. В своих научных трудах С.А. Мегуид (S.A. Meguid) исследовал влияние технологических параметров на поле ОН на основе моделирования соударения с одной [10] и множеством частиц дроби [11–14], используя разработанную модель ячейки симметрии обрабатываемой поверхности.

Схожий с примененным в работах [11, 12] подход предложил Т. Ким (T. Kim) [15]. Дж. Шварцер (J. Schwarzer) [16] показал, что выбор последовательности независимых соударений шариков о поверхность значительно влияет на получаемые результаты. Подход, связанный со стохастическим законом распределения начальных положений моделей частиц дроби, впервые был представлен в трудах

Х.Ю. Мяо (H.Y. Miao) [17, 18] и в дальнейшем развит в статье Т.К. Фама (T.Q. Pham) [19]. Необходимое для требуемой степени покрытия количество частиц определяли из предварительного расчета.

Общим существенным недостатком перечисленных моделей ДСО является неполная обоснованность выбора их параметров, зависящих от технологических показателей процесса: скорости дробы, количества приходящих на выбранный участок поверхности частиц дробы, последовательности падения частиц и времени между последующими соударениями.

В работе Дж. Лабаса (G. Labeas) [20] проблема выбора параметров модели обработки решена с помощью кинематической модели процесса, учитывающей форму сопла и линейную скорость движения дробомета, размер, форму и скорость шариков дробы, массовый расход дробы, расстояние между соплом и обрабатываемой поверхностью. Кинематическая модель Дж. Лабаса [20], получившая развитие в статье Дж. И. Милонаса (G.I. Mylonas) [21], была использована для определения шаблонов расположения частиц дробы при заданных типе и массовом расходе дробы обрабатывающей установкой.

В настоящей работе описан метод расчета поля ОН и наклепа (под которым понимается эквивалентная по Мизесу пластическая деформация), наведенных в ходе ДСО, на основе КЭ-моделирования последовательного внедрения микрошариков на малом участке обрабатываемого материала в упругопластической постановке. Особенностью разработанного метода является универсальность по отношению к технологическим параметрам обработки и свойствам упрочняемой детали: структура метода обеспечивает автоматическую реконфигурацию расчетной конечно-элементной модели (КЭМ) в зависимости от исходных данных.

Приведены результаты моделирования процесса ДСО с использованием предложенного подхода при различных технологических параметрах. Описана методика обработки результатов и построения эпюр компонент ОН по глубине приповерхностного слоя детали. Исследована зависимость этих эпюр от технологических параметров процесса.

Описание метода моделирования ДСО. При разработке метода моделирования дробеструйного упрочнения приняли допущение об иде-

альной сферической форме дробы. Также не учитывали технологическую наследственность упрочняемой детали, нагрев пластины и шероховатость обрабатываемых поверхностей (анализ влияния шероховатости поверхности на получаемые эпюры компонент ОН проведен в работе [22]).

Структурная схема метода моделирования ДСО приведена на рис. 1. Начальным запускаемым блоком модели является программа Main.py, написанная на языке Python и служащая для автоматического формирования входного текстового файла в формате «*.k» для решателя LS-DYNA. Формируемый файл содержит в себе данные о КЭМ и зависит от исходных параметров. После создания входного текстового файла он поступает в программу LS-DYNA, где решается задача о соударении частиц дробы о малый участок обрабатываемой детали в динамической постановке с использованием метода конечных элементов.

Исходными данными для разработанной модели ДСО являются параметры КЭМ участка приповерхностного слоя обрабатываемой детали и технологические параметры процесса. Первая группа параметров определяет КЭМ участка обрабатываемой поверхности детали (рис. 2, а). Эта КЭМ, представляющая собой параллелепипед, разбитый на линейные восьмиузловые твердотельные конечные элементы, составлена так, что в недеформированном состоянии грани элементов параллельны осям координат.

Дискретизация модели вдоль осей X, Y (рис. 3, а) проведена при постоянных значени-

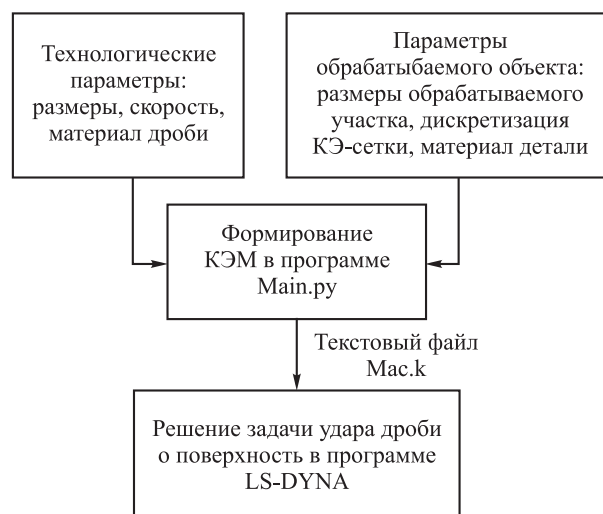


Рис. 1. Структурная схема метода моделирования ДСО

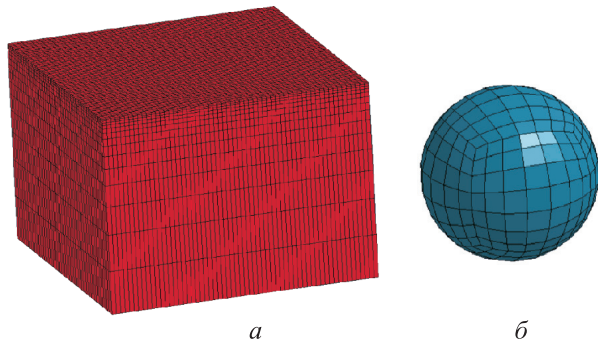


Рис. 2. КЭМ участка обрабатываемой поверхности (а) и частицы дроби (б)

ях шагов dx , dy . Вдоль вертикальной оси Z выполнено сгущение элементов к внешней поверхности модели. Использование подобного подхода позволяет корректно моделировать контактное взаимодействие поверхности с падающей дробью. КЭМ участка обрабатываемой детали имела следующие геометрические параметры: $a = 0,6$ мм; $b = 0,6$ мм; $c = 0,5$ м; $a_1 = 100$ мкм; $b_1 = 100$ мкм; $a_2 = 25$ мкм; $b_2 = 25$ мкм; $dx = 10$ мкм; $dy = 10$ мкм; $dz_0 = 4$ мкм.

Важным недостатком первых моделей ДСО [10, 12, 16] является использование моделей механических свойств материала, не учитывающих зависимость от скорости деформации, так как она может достигать 10^5 с⁻¹ [12] при контактом взаимодействии с дробью и оказывать существенное влияние на получаемое НДС. В качестве модели материала детали использована упрощенная модель Джонсона — Кука [23]:

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \right), \quad (1)$$

где σ — предел текучести; A , B , n , C , $\dot{\epsilon}_{p0}$ — параметры модели Джонсона — Кука; ϵ_p и $\dot{\epsilon}_p$ —

интенсивность пластической деформации и ее скорость.

Отличие формулы (1) от полной модели Джонсона — Кука заключается в отсутствии температурного множителя. Принятие такого допущения при моделировании ДСО возможно вследствие того, что рассматриваемый вид обработки относится к классу холодных. Предполагалось, что деталь, подвергаемая обработке, изготовлена из никелевого сплава, и что использовались следующие параметры модели материала Джонсона — Кука (значения параметров для сплава Inconel 718 взяты из работы [24]): $A = 460$ МПа, $B = 1700$ МПа, $n = 0,65$, $C = 0,017$, $\dot{\epsilon}_{p0} = 0,001$ с⁻¹. Прочими механическими характеристиками являлись плотность ρ , модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^6$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Вторая группа параметров определяет свойства КЭМ частиц дроби, представляющих собой сферические тела. КЭ-разбиение дроби проведено с использованием линейных твердотельных восьмиузловых элементов (рис. 2, б). Радиус R каждой из частиц определяется из функции равномерного закона случайного распределения, характеризуемого исходными значениями технологических параметров — минимальным R_{\min} и максимальным R_{\max} значениями радиуса частицы дроби.

Центры частиц дроби в начальный момент времени расположены внутри зоны 2 (рис. 3, б), а значения их координат вдоль осей X , Y также определяются из функции равномерного закона случайного распределения. Координаты центров последовательно падающих на обрабатываемую поверхность частиц дроби вдоль вертикальной оси Z смещены относительно друг друга на постоянный шаг (рис. 4).

Описанный подход к случайному выбору начальных координат центров шариков дроби

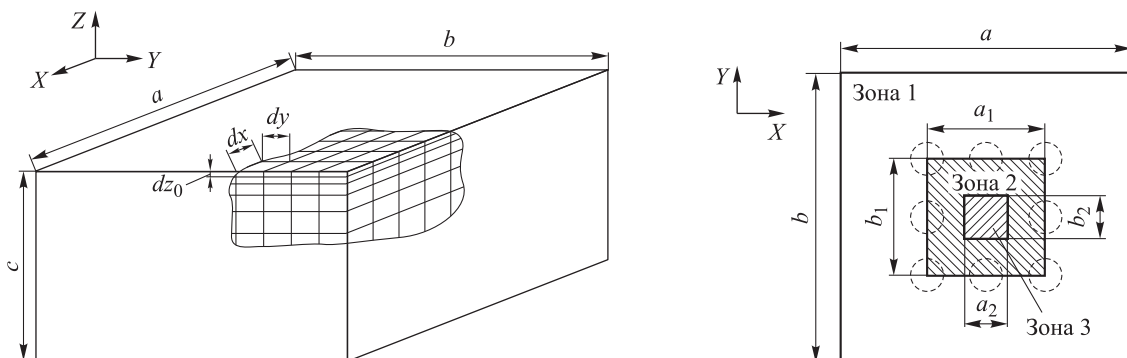


Рис. 3. Дискретизация КЭМ участка обрабатываемой детали (а) и схема расположения зон на внешней поверхности детали (б)

обеспечивает равномерное покрытие рассматриваемой зоны обрабатываемой поверхности вмятинами от соударений с частицами дроби. Смещение центров частиц дроби относительно друг друга вдоль вертикальной оси Z приводит к тому, что в любой момент времени происходит контактное взаимодействие поверхности только с одним шариком дроби.

К исходным технологическим параметрам также относятся компоненты вектора скорости v_x , v_y и v_z каждого из шариков дроби относительно геометрических осей X , Y и Z соответственно. Компоненты вектора скорости для всех шариков дроби приняты одинаковыми. В данной работе рассмотрен случай нормального падения шариков на обрабатываемую поверхность.

В статье С.А. Мегуида [11] показано, что отсутствие учета деформируемости дроби при моделировании ДСО приводит к получению завышенных по модулю значений сжимающих напряжений у поверхности детали, поэтому в данной работе в качестве модели материала частиц дроби использован линейный упругий закон поведения. Материал дроби — никелевый сплав, значения механических характеристик заданы равными аналогичным параметрам модели материала обрабатываемой детали.

Условиями закрепления участка обрабатываемой детали являлись следующие кинематические граничные условия:

- на узлы, принадлежащие нижней горизонтальной плоскости КЭМ участка детали, наложен запрет на перемещение по всем трем степеням свободы;
- на узлы, принадлежащие боковым граням модели участка детали, наложен запрет на перемещение вдоль нормали к поверхности.

Эти граничные условия позволяют учесть взаимодействие рассматриваемого участка с основным объемом детали. Высоту модели участка детали выбрали достаточной для того, чтобы краевые эффекты от сил реакций в закрепленных по нижней плоскости узлах не влияли на НДС в области контактного взаимодействия. Согласно подходу, предложенному в работах [17, 18], размеры зоны падения шариков дроби на поверхность (см. рис. 3, б, зона 2) выбрали малыми по сравнению с габаритными размерами a , b модели исследуемого участка в плоскости XU для исключения влияния краевых эффектов, вызванных наложенными кинематическими граничными условиями, на получаемое поле НДС в области обработки.

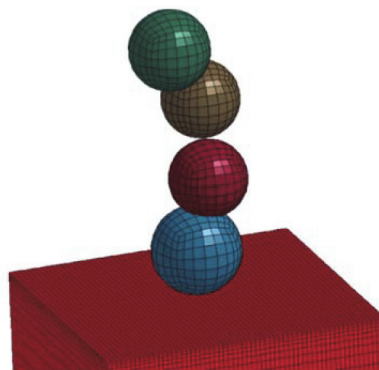


Рис. 4. Смещение начальных положений моделей шариков дроби относительно друг друга по высоте

Между КЭМ шариков дроби и обрабатываемой поверхностью задавали контактное взаимодействие, взаимодействие между частицами дроби не учитывали. Для учета сил трения при контактном взаимодействии использовали модель сухого трения Кулона. Коэффициент трения для ДСО никелевого сплава $\mu_{fr} = 0,2$. Для предотвращения численной неустойчивости в процессе решения поставленной задачи вследствие возникновения в системе высокочастотных колебаний для модели участка обрабатываемой детали был задан относительный коэффициент демпфирования, равный 50 % (в долях от критического).

Решение задачи о внедрении шариков в поверхность детали в динамической постановке проводили с использованием явной схемы интегрирования. Максимально допустимый шаг интегрирования уравнений движения при выборе явной схемы определял решатель LS-DYNA автоматически из условия Куранта [25] и методик для оценки высшей собственной частоты системы по соотношениям геометрических размеров конечных элементов [26].

Результаты моделирования. Для исследования влияния количества соударений частиц дроби о поверхность на результаты расчета с помощью предложенного метода проведено КЭ-моделирование падения 500 шариков дроби на малый участок обрабатываемой поверхности. Общее количество узлов модели упрочняемой поверхности и 500 шариков составило 1 347 815, общее количество элементов — 1 250 900. Расчеты выполнены в программном комплексе LS-DYNA в режиме распараллеливания на восемь потоков на персональном компьютере, имеющем следующие характеристики: процессор Intel Core i7-5930K, 64 GB

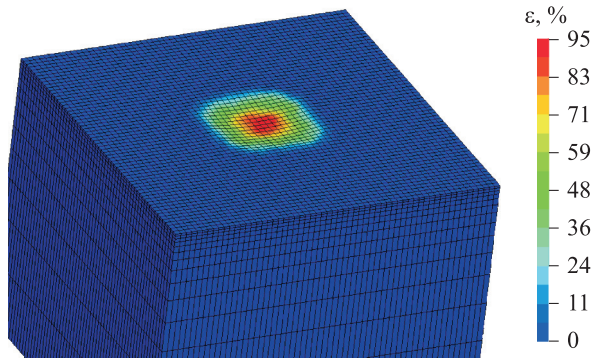


Рис. 5. Поле интенсивности пластической деформации ε , %, обрабатываемой детали после падения 500 шариков дроби

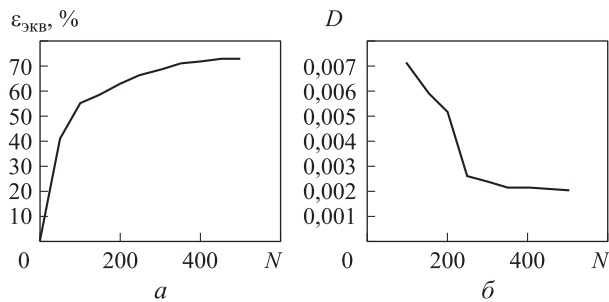


Рис. 6. Зависимости эквивалентной пластической деформации $\varepsilon_{\text{экв}}$ (а) и ее максимальной дисперсии D (б) в приповерхностном слое обрабатываемой детали от количества соударений N шариков дроби о поверхность

RAM. Среднее время расчета для одного набора технологических параметров при моделировании 500 соударений составило 40 ч. Результаты моделирования процесса ДСО малого участка детали для режима $v = 80$ м/с, $R = 0,08 \dots 0,10$ мм приведены на рис. 5 и 6.

Зависимость эквивалентной пластической деформации в приповерхностном слое обрабатываемой детали от количества соударений шариков дроби о поверхность приведена на рис. 6, а. Здесь наблюдается стабилизация кривой при достижении 400 соударений частиц о поверхность.

На рис. 6, б представлена зависимость максимальной дисперсии эквивалентной пластической деформации от количества соударений шариков дроби о поверхность. Дисперсия рассчитывается по значениям наклепа в точках, лежащих на одной глубине внутри обрабатываемой площадки, и характеризует степень неоднородности поля эквивалентной пластической деформации. Вид кривой на рис. 6, б свидетельствует о выравнивании поля пластической деформации внутри выбранной площадки при

увеличении количества соударений шариков дроби о поверхность.

Для построения эпюр компонент ОН, наведенных в процессе ДСО, вдоль глубины приповерхностного слоя детали использовали процедуру осреднения эпюр по площади, описанную в работах [11, 15]. Размеры зоны, внутри которой проводилось осреднение получаемых в ходе расчета эпюр компонент ОН, выбирались меньшими, чем область падения частиц дроби, для исключения краевых эффектов на границе зоны попадания частиц дроби и определялись такими параметрами КЭМ, как a_2 , b_2 (см. рис. 3, б, зона 3).

Результаты работы программы по обработке и выводу эпюр компонент ОН вдоль глубины приповерхностного слоя детали для выбранного режима приведены на рис. 7. На глубине $h = 10 \dots 15$ мкм наблюдаются максимальные сжимающие компоненты напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} по осям X, Y и Z соответственно, достигающие 1130 МПа. На глубине $h = 90$ мкм сжимающие напряжения сменяются растягивающими. Для наглядности представления результатов на рис. 7 также показаны условные эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{усл}}$. По абсолютному значению они равны эквивалентным напряжениям по Мизесу, знак определяется знаком суммы трех главных напряжений.

Для оценки влияния технологических параметров на эпюру компонент ОН составлен план численного эксперимента, приведенный в таблице, где v — скорость шариков дроби. Для каждого из рассматриваемых технологических режимов проведено моделирование процесса ДСО при соударении 400 шариков дроби о поверхность.

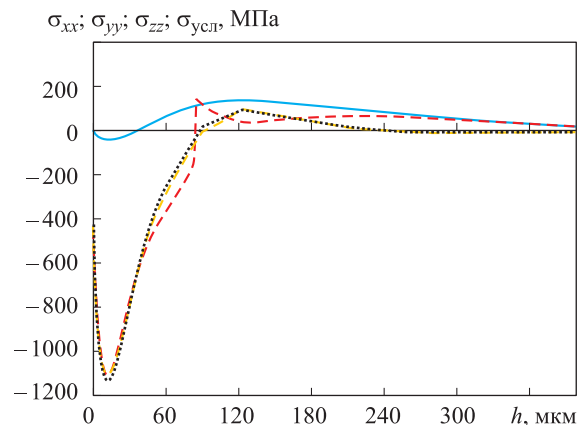


Рис. 7. Эпюры компонент ОН σ_{xx} (---), σ_{yy} (.....), σ_{zz} (—) и условного эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{усл}}$ (- - -) по глубине h обрабатываемой детали

Таблица 1

План численного эксперимента

Номер расчета	v , м/с	R_{\min} , мм	R_{\max} , мм
1	80	0,06	0,08
2	80	0,08	0,10
3	80	0,10	0,12
4	60	0,08	0,10
5	100	0,08	0,10

Результаты моделирования для выбранных режимов обработки в виде эпюр параметров (компоненты ОН σ_{xx} и эквивалентной пластической деформации), характеризующих НДС детали после ДСО, приведены на рис. 8, 9 и разделены на две группы: варьирование диапазонов размеров шариков дроби (расчеты № 1, 2, 3;

рис. 8) и изменение скорости шариков дроби (расчеты № 2, 4, 5; рис. 9).

Анализ результатов показал, что технологические параметры режима ДСО могут существенно влиять на вид получаемых эпюр наклепа и компонент ОН по глубине приповерхностного слоя детали. Наблюдаемая зависимость максимального уровня сжимающих напряжений от квадратного корня скорости потока дроби (рис. 9, а) соответствует данным, представленным в работе [27]. Максимальное значение наклепа, наведенного в процессе упрочнения в поверхностном слое детали, более чувствительно к режиму ДСО, чем значения ОН (рис. 8, б и 9, б).

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных. Для проверки разработанного метода проведено моделирование

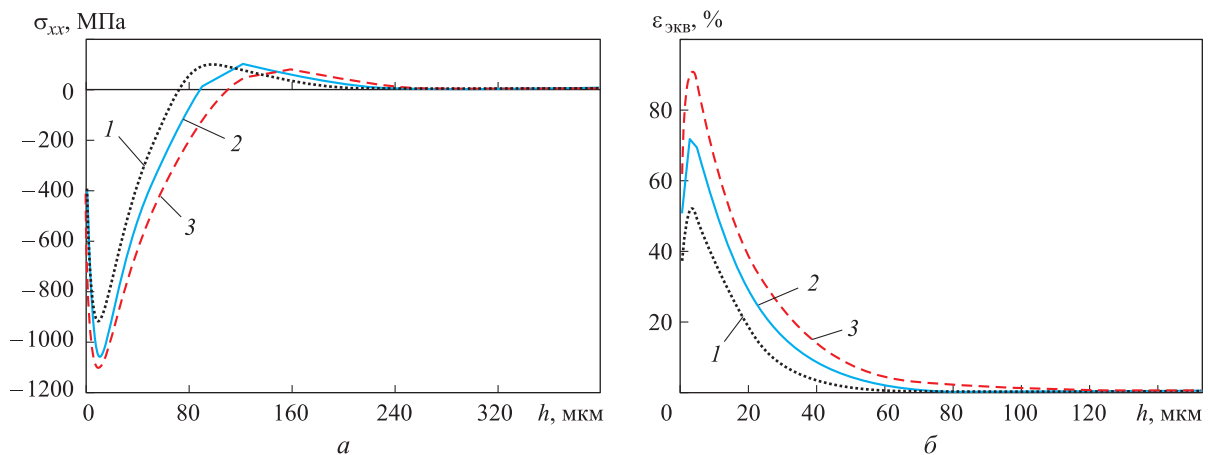


Рис. 8. Эпюры компоненты ОН σ_{xx} (а) и эквивалентной пластической деформации $\epsilon_{\text{экв}}$ (б) по глубине h приповерхностного слоя детали при $v = 80$ м/с и различных размерах шариков дроби: 1 — $R = 0,06 \dots 0,08$ мм; 2 — $R = 0,08 \dots 0,10$ мм; 3 — $R = 0,10 \dots 0,12$ мм

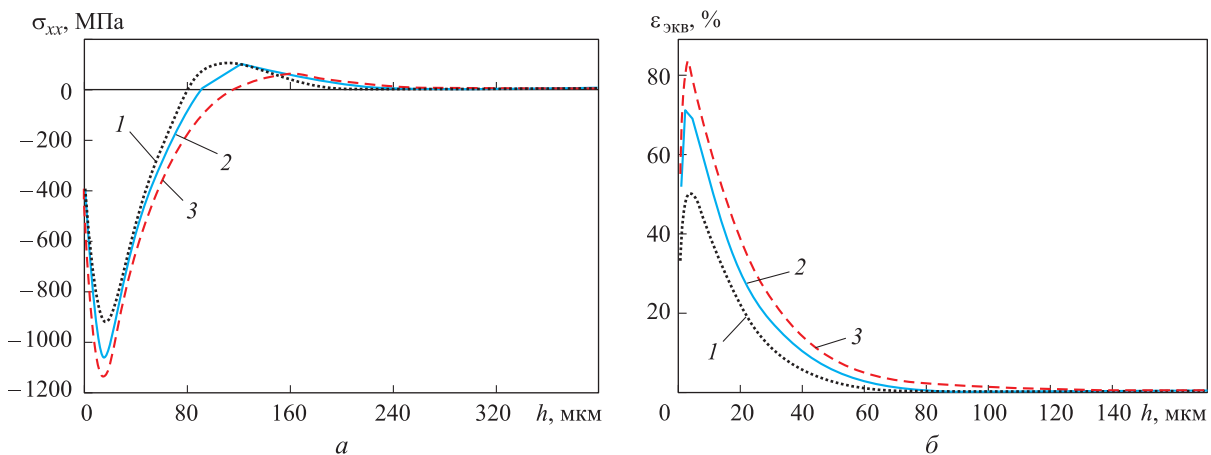


Рис. 9. Эпюры компоненты ОН σ_{xx} (а) и эквивалентной пластической деформации $\epsilon_{\text{экв}}$ (б) по глубине h приповерхностного слоя детали при $R = 0,08 \dots 0,10$ мм и различных значениях скорости шариков дроби: 1 — $v = 60$ м/с; 2 — $v = 80$ м/с; 3 — $v = 100$ м/с

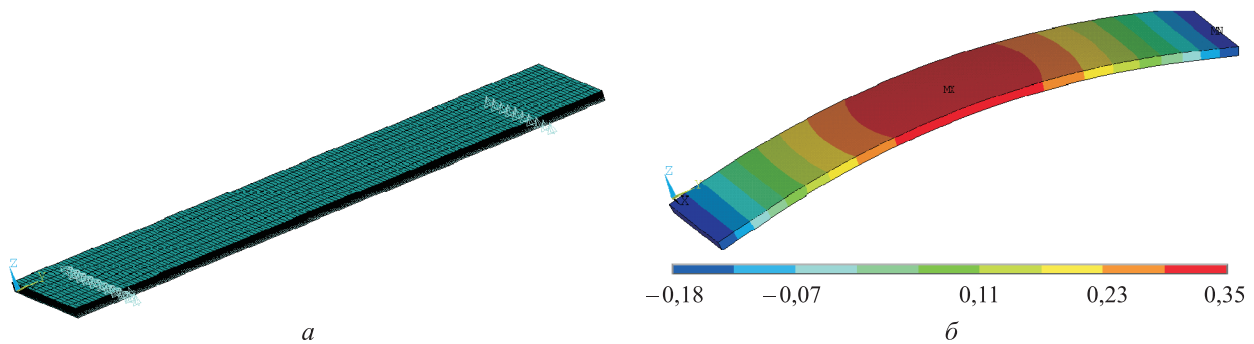


Рис. 10. Моделирование теста Алмена:
 а — КЭМ с граничными условиями; б — перемещения в нормальном направлении, мм

теста Дж.О. Алмена [2]. Значение прогиба упрочняемой детали характеризует наведенные в поверхностном слое образца начальные напряжения и, косвенно, интенсивность процесса ДСО.

Расчет выполнен с закреплением модели по двум шарнирным опираниям, соответствующим установке образца на измерительное приспособление (рис. 10, а). В этом случае приложение эпюры ОН приводит к деформации образца. На рис. 10, б приведены перемещения КЭМ в направлении оси Z (перпендикулярно плоскости образца) относительно мест крепления, полученные в результате выполнения статического решения.

Как видно из представленных результатов, максимальный прогиб составляет 0,35 мм, что приблизительно соответствует диапазону значений 0,3 (+0,0...0,1) мм, указанному в отраслевой инструкции. Качественная и количественная картины перемещений свидетельствуют об отсутствии грубых ошибок в расчетах.

Выводы

1. Разработан метод моделирования ДСО на основе КЭ-моделирования последовательного внедрения микрошариков на малом участке

обрабатываемого материала. Автоматическое формирование расчетной КЭМ на базе исходных данных о технологических параметрах обработки и свойствах упрочняемого объекта позволяет проводить многовариантное моделирование процесса с варьируемыми значениями параметров. Результатами моделирования являются эпюры ОН и пластических деформаций, наведенных в поверхностном слое детали в процессе ДСО.

2. Предложенный способ обработки результатов моделирования позволяет строить осредненные по площади эпюры компонент ОН вдоль глубины приповерхностного слоя детали. Этот способ использован для анализа влияния скорости и размера дроби на получаемые эпюры ОН на основе результатов моделирования процесса обработки.

3. Дальнейшим развитием разработанного метода может являться введение кинематической модели процесса ДСО для учета переменных локальных технологических условий обработки (модуля и направления вектора скорости дроби, числа падающих частиц дроби, временного интервала между последующими соударениями и т. д.) вдоль упрочняемой поверхности детали, а также шероховатости обрабатываемой поверхности.

Литература

- [1] Петухов А.Н. *Сопротивление усталости деталей ГТД*. Москва, Машиностроение, 1993. 240 с.
- [2] Almen J.O., Black P.H. *Residual stresses and fatigue in metals*. McGraw-Hill, 1963. 12 p.
- [3] Prevey P.S. The measurement of subsurface residual stress and cold work distributions in nickel base alloys. *Residual Stress in Design, Process and Materials Selection*, ASM, Metals Park, OH, 1987, pp. 11–19.
- [4] Ezeilo A., Webster G., Webster P.J., Webster P.S. Comparison of shot peening residual stress distributions in a selection of materials. *5th International Conference on Shot Peening*, Oxford, UK, Sept. 1993, pp. 13–17.

- [5] Shaw M.C., DeSalvo G.J. On the plastic flow beneath a blunt axisymmetric indenter. *Journal of Engineering for Industry*, 1970, vol. 92, no. 2, pp. 480–492, doi: 10.1115/1.3427786
- [6] Johnson W. *Impact strength of materials*. Edward Arnold, 1972. 361 p.
- [7] Schiffner K., Droste Gen Helling C. Simulation of residual stresses by shot peening. *Computers & structures*, 1999, vol. 72, no. 1, pp. 329–340, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00012-7
- [8] Ikushima K., Shibahara M., Akita K., Suzuki H., Morooka S., Nishikawa S., Furukawa T. Numerical analysis of residual stress distribution on peening process. *Welding in the World*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 517–527, doi: 10.1007/s40194-017-0430-4
- [9] Wang T., Platts M.J., Levers A. A process model for shot peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 172, no. 2, pp. 159–162, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.006
- [10] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite elements in analysis and design*, 1999, vol. 31, no. 3, pp. 179–191, doi: 10.1016/S0168-874X(98)00057-2
- [11] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. Development and validation of novel FE models for 3D analysis of peening of strain-rate sensitive materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2007, vol. 129, no. 2, pp. 271–283, doi: 10.1115/1.2712469
- [12] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, vol. 27, no. 2, pp. 119–134, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00043-4
- [13] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Liew K.M., Ong L.S. Relaxation of peening residual stresses due to cyclic thermo-mechanical overload. *Journal of engineering materials and technology*, 2005, vol. 127, no. 2, pp. 170–178, doi: 10.1115/1.1867986
- [14] Meguid S.A., Maricic L.A. Finite Element Modeling of Shot Peening Residual Stress Relaxation in Turbine Disk Assemblies. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2015, vol. 137, no. 3, pp. 031003, doi: 10.1115/1.4030066
- [15] Kim T., Lee J.H., Lee H., Cheong S.-k. An area-average approach to peening residual stress under multi-impacts using a three-dimensional symmetry-cell finite element model with plastic shots. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 50–59, doi: 10.1016/j.matdes.2009.07.032
- [16] Schwarzer J., Schulze V., Vöhringer O. Evaluation of the influence of shot peening parameters on residual stress profiles using finite element simulation. *Materials Science Forum*, 2003, vol. 426, pp. 3951–3956.
- [17] Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, vol. 40, no. 10, pp. 1023–1038, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.03.013
- [18] Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation. *Advances in Engineering Software*, 2011, vol. 42, no. 11, pp. 963–975, doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.05.025
- [19] Pham T.Q., Khun N.W., Butler D.L. New approach to estimate coverage parameter in 3D FEM shot peening simulation. *Surface Engineering*, 2017, vol. 33(9), pp. 687–695, doi: 10.1080/02670844.2016.1274536
- [20] Labeas G., Rodopoulos C.A., Spinner D. Relating shot peening process parameters to residual stresses – a computational/stochastic marriage. *Electronic Incorporated-The Shot Peener-Shot Peening Library*, 2008, vol. 22, pp. 1–15. URL: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2008012.pdf> (accessed 05 August 2018).
- [21] Mylonas G.I., Labeas G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: residual stress, surface roughness and cold work prediction. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, no. 19, pp. 4480–4494, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.080
- [22] Мифтахов А.А., Мазеин П.Г. Моделирование остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке. *Известия Челябинского научного центра УрО РАН*, 2006, № 4, с. 129–133.
- [23] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983, vol. 21, no. 1, pp. 541–547.
- [24] Joshi D.R. *Finite Element Simulation of Machining a Nickel-based Superalloy-Inconel 718*. Degree of master of science. Oklahoma State University, 2004. 128 p.
- [25] Bathe K.J. *Finite element procedures*. Pearson Education. 2006. 1043 p.

- [26] Hallquist J.O. *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore Software Technology Corporation, vol. 970. 2007.
- [27] Саверин М.М. *Дробеструйный наклеп*. Москва, Машгиз, 1955. 312 с.

References

- [1] Petukhov A.N. *Soprotivleniye ustalosti detaley GTD* [The fatigue resistance of gas turbine engine parts]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1993. 240 p.
- [2] Almen J.O., Black P.H. *Residual stresses and fatigue in metals*. McGraw-Hill, 1963. 12 p.
- [3] Prev y P.S. The measurement of subsurface residual stress and cold work distributions in nickel base alloys. *Residual Stress in Design, Process and Materials Selection*, ASM, Metals Park, OH, 1987, pp. 11–19.
- [4] Ezeilo A., Webster G., Webster P.J., Webster P.S. Comparison of shot peening residual stress distributions in a selection of materials. *5th International Conference on Shot Peening*, Oxford, UK, Sept. 1993, pp. 13–17.
- [5] Shaw M.C., DeSalvo G.J. On the plastic flow beneath a blunt axisymmetric indenter. *Journal of Engineering for Industry*, 1970, vol. 92, no. 2, pp. 480–492, doi: 10.1115/1.3427786
- [6] Johnson W. *Impact strength of materials*. Edward Arnold, 1972. 361 p.
- [7] Schiffner K., Droste Gen Helling C. Simulation of residual stresses by shot peening. *Computers & structures*, 1999, vol. 72, no. 1, pp. 329–340, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00012-7
- [8] Ikushima K., Shibahara M., Akita K., Suzuki H., Morooka S., Nishikawa S., Furukawa T. Numerical analysis of residual stress distribution on peening process. *Welding in the World*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 517–527, doi: 10.1007/s40194-017-0430-4
- [9] Wang T., Platts M.J., Levers A. A process model for shot peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 172, no. 2, pp. 159–162, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.006
- [10] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite elements in analysis and design*, 1999, vol. 31, no. 3, pp. 179–191, doi: 10.1016/S0168-874X(98)00057-2
- [11] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. Development and validation of novel FE models for 3D analysis of peening of strain-rate sensitive materials. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2007, vol. 129, no. 2, pp. 271–283, doi: 10.1115/1.2712469
- [12] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, vol. 27, no. 2, pp. 119–134, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00043-4
- [13] Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Liew K.M., Ong L.S. Relaxation of peening residual stresses due to cyclic thermo-mechanical overload. *Journal of engineering materials and technology*, 2005, vol. 127, no. 2, pp. 170–178, doi: 10.1115/1.1867986
- [14] Meguid S.A., Maricic L.A. Finite Element Modeling of Shot Peening Residual Stress Relaxation in Turbine Disk Assemblies. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2015, vol. 137, no. 3, pp. 031003, doi: 10.1115/1.4030066
- [15] Kim T., Lee J.H., Lee H., Cheong S.-k. An area-average approach to peening residual stress under multi-impacts using a three-dimensional symmetry-cell finite element model with plastic shots. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 50–59, doi: 10.1016/j.matdes.2009.07.032
- [16] Schwarzer J., Schulze V., V hringer O. Evaluation of the influence of shot peening parameters on residual stress profiles using finite element simulation. *Materials Science Forum*, 2003, vol. 426, pp. 3951–3956.
- [17] Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, vol. 40, no. 10, pp. 1023–1038, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.03.013
- [18] Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation. *Advances in Engineering Software*, 2011, vol. 42, no. 11, pp. 963–975, doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.05.025
- [19] Pham T.Q., Khun N.W., Butler D.L. New approach to estimate coverage parameter in 3D FEM shot peening simulation. *Surface Engineering*, 2017, vol. 33(9), pp. 687–695, doi: 10.1080/02670844.2016.1274536
- [20] Labeas G., Rodopoulos C.A., Spinner D. Relating shot peening process parameters to residual stresses – a computational/stochastic marriage. *Electronic Incorporated-The Shot Peen-*

- er-Shot Peening Library*, 2008, vol. 22, pp. 1–15. Available at: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2008012.pdf> (accessed 05 August 2018).
- [21] Mylonas G.I., Labeas G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: residual stress, surface roughness and cold work prediction. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, no. 19, pp. 4480–4494, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.080
- [22] Miftakhov A.A., Mazein P.G. Modeling of residual stresses in gidrodrobestruynoe treatment. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2006, no. 4, pp. 129–133 (in Russ.).
- [23] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983, vol. 21, no. 1, pp. 541–547.
- [24] Joshi D.R. *Finite Element Simulation of Machining a Nickel-based Superalloy-Inconel 718*. Degree of master of science. Oklahoma State University, 2004. 128 p.
- [25] Bathe K.J. *Finite element procedures*. Klaus-Jürgen Bathe, 2006. 1043 p.
- [26] Hallquist J.O. *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore Software Technology Corporation, vol. 970. 2007.
- [27] Saverin M.M. *Drobestruynnyu naklep* [Shot peening]. Moscow, Mashgiz publ., 1955. 312 p.

Статья поступила в редакцию 05.09.2018

Информация об авторах

КИСЕЛЁВ Игорь Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская, д. 5, e-mail: i.a.kiselev@bmstu.ru).

ЖУКОВ Никита Александрович — ассистент кафедры «Прикладная механика»; инженер НИИ АПП. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская, д. 5, e-mail: jukov.n@yandex.ru).

ВАСИЛЬЕВ Борис Евгеньевич — кандидат технических наук, начальник отдела. Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова; доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, e-mail: b_vasilyev@ciam.ru).

СЕЛИВАНОВ Александр Николаевич — инженер. Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: anselivanov@ciam.ru).

Information about the authors

KISELEV Igor Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: i.a.kiselev@bmstu.ru).

ZHUKOV Nikita Aleksandrovich — Teaching Assistant, Department of Applied Mechanics; Engineer, Research Institute for Automation of Manufacturing Processes. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jukov.n@yandex.ru).

VASILIEV Boris Evgenievich — Candidate of Science (Eng.), Head of Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM; Associate Professor, Department of Gas Turbine and Non-Conventional Power Plants. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: b_vasilyev@ciam.ru).

SELIVANOV Aleksandr Nikolaevich — Engineer. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: anselivanov@ciam.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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, doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-49-59

Please cite this article in English as:

Kiselev I.A., Zhukov N.A., Vasilyev B.E., Selivanov A.N. Modeling of Residual Stresses when Calculating Strength of Lock Joint Elements. Part 1. Modeling of the Shot Peening Process. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 11, pp. 49–59 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-11-49-59