

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.98.042
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128



ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДРОБЬЮ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Одними из наиболее сложных элементов в конструкции самолета являются крупногабаритные обводообразующие панели и обшивки. Сложность изготовления объясняется специфической пространственной формой – сочетанием участков знакопеременной двойной кривизны в совокупности с большими габаритными размерами (длина таких деталей может достигать 30 м) и малой жесткостью. Эффективным подходом к получению формы двойной кривизны является использование методов поверхностного пластического деформирования – обработки дробью и методов локальной обработки – раскатки и посадки ребер. Большинство методик для определения режимных параметров процесса строятся на экспериментальных исследованиях кривизны и удлинения образцов в процессе обработки, а также на основе теории упругости в области исследования остаточных напряжений. **Цель работы.** Совершенствование методик расчета режимных параметров обработки металлов методами поверхностного пластического деформирования. **Используемые методы.** Конечно-элементное моделирование процесса поверхностного пластического деформирования на примере обработки дробью. **Новизна.** Использование концепции начальных напряжений, являющихся источником изгибной деформации и деформации удлинения для описания процесса обработки дробью. **Результаты.** Разработана методика определения распределений начального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя элементарных участков деталей. Разработана методика интеграции начального напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой натуральных деталей с целью получения прогнозируемой кривизны деталей в требуемом направлении. Сопоставлены результаты моделирования с имеющимися результатами экспериментальных исследований по обработке образцов пластинок методом дробеударного формообразования. **Практическая значимость.** Использование подхода начальных напряжений для описания процесса обработки дробью обеспечивает возможность расчета режимных параметров процесса, отказавшись от большого числа экспериментальных исследований. С применением методов компьютерного моделирования решен комплекс задач, направленных на повышение эффективности производства обводообразующих деталей сложной формы и их качества за счёт раскрытия закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния при обработке деталей.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, обработка металлов давлением, остаточные напряжения, начальные напряжения, напряженно-деформированное состояние

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В., 2022

Для цитирования

Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 120-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF INITIAL STRESSES DURING SHOT PEENING

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoylenko O.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). One of the most complicated elements in the plane design is large-size outer mold line panels and shell. Manufacturing complexity is attributed to a peculiar spatial outline, namely a combination of zones of fluctuating double curvature and large size (length of such parts may be 30 m) and low stiffness. An efficient approach to manufacturing a double curvature shape is surface plastic deformation methods, namely shot peening and local treatment (flattening-out and fitting of edges). Most methods used to determine mode parameters of the processes are based on experimental studies on curvature and elongation of samples during treatment, and elasticity theory in studies on residual stresses. **Objectives.** The research is aimed at improving the methods used to calculate mode parameters of metal forming by surface plastic deformation. **Methods Applied.** finite element modeling of the surface plastic deformation process using shot peening as an example. **Originality.** It lies in using a concept of initial stresses, being a source of bending strain and extensional strain, to describe a shot peening processes. **Results.** The authors developed methods for determining the distributions of the initial stress-strain state of the surface layer of element sections of parts, and for integrating the initial stress-strain state into the surface layer of full-scale parts in order to obtain the predicted curvature of the parts in the required direction. The simulation results were compared with the available results of experimental studies on the processing of plate samples by the shot peening method. **Practical Relevance.** An approach of initial stresses applied to describe the shot peening process contributes to calculating mode parameters of the processes, showing no need for a large number of experimental studies. Computer simulation methods were applied to settle a range of issues aimed at increasing efficiency and quality of manufacturing outer mold line parts of a complicated shape by finding patterns of forming the stress-strain state, when processing parts.

Keywords: surface plastic deformation, metal forming, residual stresses, initial stresses, stress-strain state

The research has been carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030".

For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Samoylenko O.V. Development of Initial Stresses During Shot Peening. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 120-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>

Введение

В современном авиастроении в качестве обводообразующих элементов широко используются панели, которые могут представлять собой сборные конструкции в виде обшивки с присоединёнными, в основном клёпкой, элементами силового набора, а также монолитно-фрезерованные панели, изготавливаемые из плит или специальных профилей. Применение панелей определено повышением прочности и жесткости конструкции, а также улучшением аэродинамических характеристик. За счет изготовления панелей максимально возможной длины и, соответственно, уменьшения количества крепёжных деталей и поперечных швов снижается общая масса крыла [1, 2].

Пространственная форма панелей представляет сочетание линейчатых поверхностей и поверхностей с участками кривизны и круткой се-

чений (рис. 1). Как правило, кривизна является переменной величиной от одного сечения детали к другому и может иметь разный знак [3, 4].

Требуемая точность геометрической формы обводообразующих деталей характеризуется допустимыми отклонениями пространственной формы от теоретического контура, лежащими в пределах 0,1-1 мм [5].

Основными методами формообразования таких деталей являются гибка различными способами (на прессовом оборудовании, гибка-прокатка, гибка с растяжением), раскатка и обработка дробью [6-9]. Наиболее перспективным направлением является дробеударное формообразование (ДУФ), так как наряду с достижением высокой точности деталей дробеобработка позволяет увеличить производительность процесса и реализовать эффект упрочнения, повышающий усталостную прочность и долговечность деталей [10].

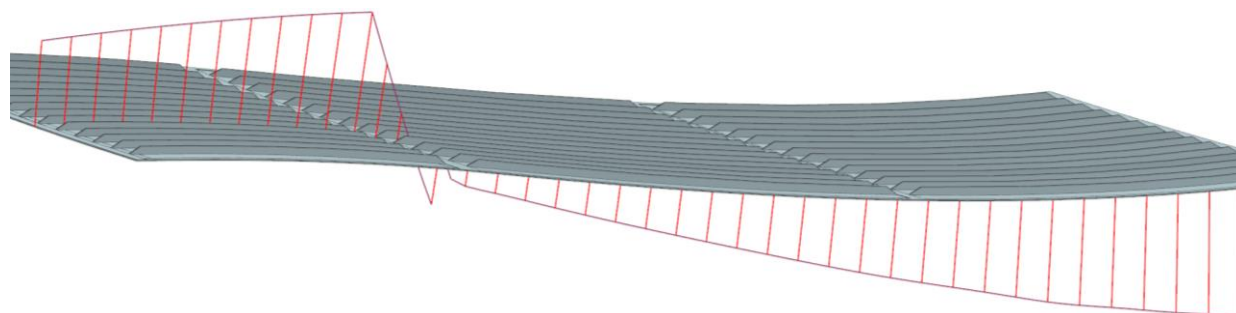


Рис. 1. Трехмерная модель типовой панели с графическим отображением распределений продольной (относительно ребер) кривизны

Fig. 1. Three-dimensional model of a typical panel, showing the distributions of the longitudinal (relative to the edges) curvature

Наиболее удобным подходом к цифровизации производства является создание конечно-элементных моделей процесса обработки, позволяющих достаточно подробно изучить свойства объектов во время процесса формообразования.

Актуальность темы исследования формируется исходя из высоких требований к точности изготавливаемых крупногабаритных обводообразующих деталей сложной формы с областью двойной кривизны, обработка которых является весьма трудоемкой из-за высокой жесткости конструкции. Для повышения точности формообразования деталей необходимо наиболее точно подбирать режимы обработки для различных деталей, учитывая специфику обработки. Для этого следует разрабатывать новые или совершенствовать существующие подходы к цифровизации производства. Целью данной работы является совершенствование методик расчета режимных параметров обработки металлов методами поверхностного пластического деформирования на основе конечно-элементного моделирования.

Исследование напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое детали после обработки дробью

В основе формообразования дробью лежит поверхностное пластическое деформирование (ППД) детали обработкой дробью, что приводит к формированию остаточного напряженно-деформированного состояния. Оценка остаточного напряженно-деформированного состояния детали после дробеобработки – один из основных подходов к определению режимных параметров процесса.

В основе определения остаточных напряжений лежит известная в теории пластичности теорема Генки о разгрузке, согласно которой остаточные напряжения равны разности между ис-

тинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости тела [11]. Теорема позволяет определить остаточные напряжения, когда известно напряженное состояние детали в стадии нагружения. Использование данной теоремы позволяет определить общую деформацию детали, а в случае конечно-элементного моделирования – найти перемещения узлов сетки модели после пластической деформации.

Общая деформация детали, возникшая вследствие поверхностной деформации, фазовых превращений и других причин названа И.А. Биргером первоначальной, а образование остаточных напряжений – это процесс уравнивания напряжений, соответствующих первоначальной деформации по силе и моменту. Данные напряжения в [12] названы начальными, их величина соответствует отклонениям от интегральных по сечению значений, определяемых уравнениями равновесия. Для математического представления процесса формоизменения используют подход, основанный на этом понятии.

В случае изгиба, вызванного ППД пластины конечной толщины, остаточные напряжения выражают как сумму начальных, нескомпенсированных напряжений и напряжений, возникающих в сечении детали от внутренней силы и изгибающего момента, вызывающих деформацию тела. Эпюра остаточных напряжений σ^0 может быть найдена алгебраическим суммированием эпюры начальных напряжений σ^H , эпюры от осевой силы σ_p и эпюры от изгибающего момента σ_M (рис. 2, а). Если же рассмотреть результаты ППД полупространства в виде эпюры остаточных напряжений, характерной для процессов резания, дробеударной

обработки и т.д. (эпюра 3 на **рис. 2, б**), увидим, что данная эпюра является неуравновешенной, что очевидно для данного случая. Для нахождения эпюры 1 начальных напряжений необходимо вычесть из результирующей эпюры 3 эпюру 2 реактивных упругих напряжений, которую можно найти по известным координатам точек *A* и *B*, лежащих на прямой *BC*.

Для определения параметров эпюры начальных напряжений на основе известной эпюры остаточных напряжений возможно использовать следующие выражения:

$$\sigma_{\Pi}^H = \sigma_{\Pi}^o + \sigma_{\Pi}^{упр} = \sigma_{\Pi}^o + \sigma' \left(1 + \frac{h_{пл}}{h_{упр} - h_{пл}} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_s^H = \sigma_s^o + \sigma_s^{упр} = \sigma_s^o + \sigma' \left(1 + \frac{h_s - h_{пл}}{h_{упр} - h_{пл}} \right). \quad (2)$$

Одним из наиболее точных методов исследования остаточного напряженно-деформированного состояния при обработке дробью является метод конечных элементов. Данное направление активно развивается и включает значительное количество работ, начиная от единичного внедрения сферического индентора [13] и заканчивая

моделированием множественных внедрений дробь с целью воссоздания степеней покрытия [14].

Исследования, изложенные в данной работе, являются продолжением работ, проводимых ФГБОУ ВО «ИрНИТУ» в области исследования процессов обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования [15, 16] и используют методики моделирования обработки дробью (режимные параметры: частота вращения дробеметного колеса 800 об/мин; подача дробемета относительно образца – 2000 мм/мин).

Конечно-элементные модели обработки дробью диаметром 3,5 мм из материала ШХ15, применяемого для формообразования авиационных деталей из алюминиевых сплавов, показаны на **рис. 3**. Исходя из схемы, предложенной на **рис. 2**, в случае если ограничить возможность возникновения осевой силы и изгибающего момента, то есть зафиксировать деталь, то остаточные напряжения можно приравнять к начальным. Следовательно, соотношение размеров обрабатываемой детали к размерам области обработки можно использовать в соотношении 1:1, так как деформации детали при ее периферийном закреплении не происходит, что подтверждается результатами моделирования.

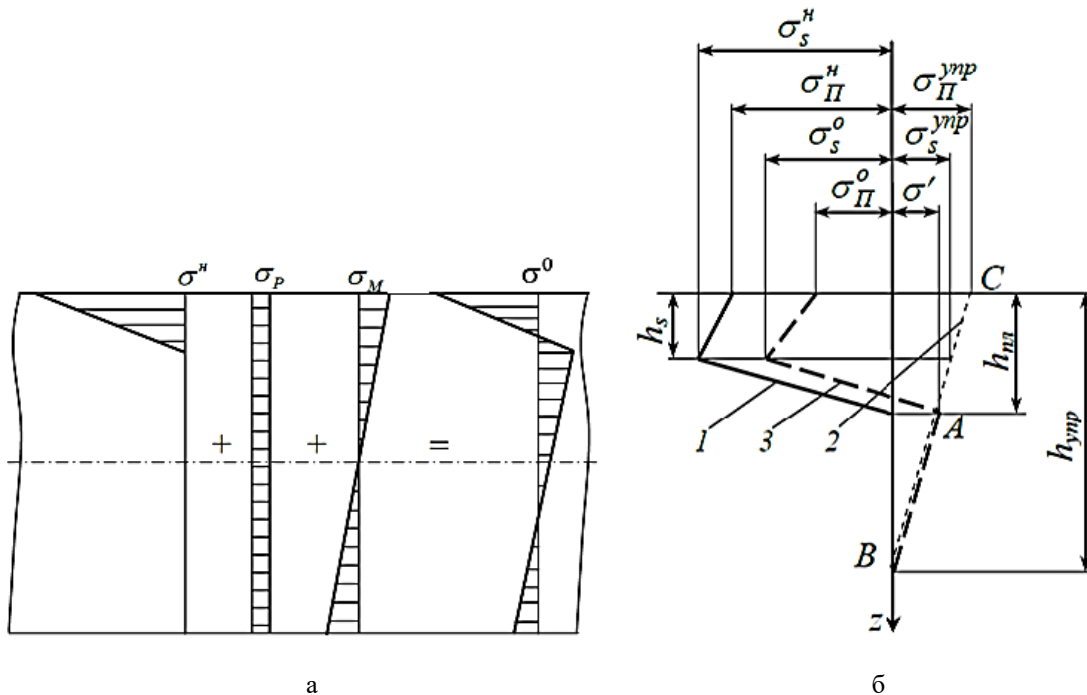


Рис. 2. Схема определения остаточных напряжений: 1 – начальные напряжения; 2 – реактивные напряжения σ_R в слоях металла, прилегающих к очагу деформации; 3 – остаточные напряжения

Fig. 2. Scheme for determining residual stresses: 1 is initial stresses; 2 is reactive stresses σ_R in metal layers adjacent to the deformation zone; 3 is residual stresses

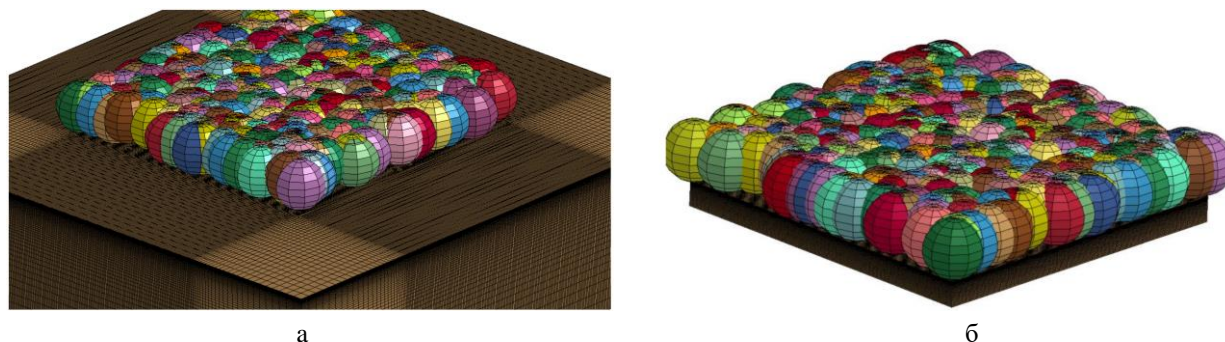


Рис. 3. Конечно-элементные модели для определения начальных напряжений: а – размеры заготовки 40×40×40 мм (при области обработки 20×20 мм); б – размеры заготовки 21×21×2 мм (при области обработки 20×20 мм)

Fig. 3. Finite element models for determining the initial stresses: a is a workpiece of 40×40×40 mm in size (when a processing area is 20×20 mm); б is a workpiece of 21×21×2 mm (when a processing area is 20×20 mm)

Результаты моделирования в виде распределений напряжений и деформаций относительно трех ортогональных осей представлены на **рис. 4**. Полученные результаты могут быть использованы для определения параметров аппроксимированной эпюры начальных напряжений согласно схеме, показанной на **рис. 2**.

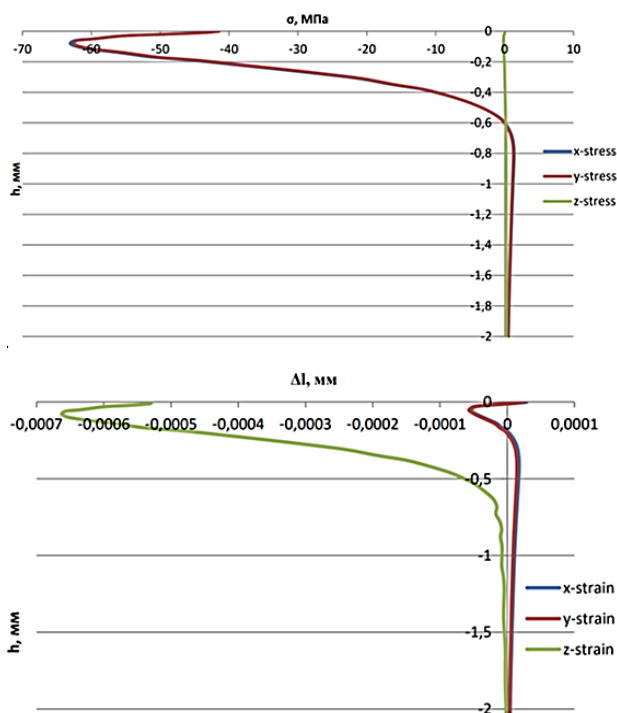


Рис. 4. Распределения остаточных (начальных) напряжений σ и деформаций ϵ после множественных внедрений дроби в участок образца с ограничением свободы при закреплении

Fig. 4. Distributions of residual (initial) stresses σ and strains ϵ after multiple shots in the sample area with constraints during fixing

Как видно из представленных иллюстраций, распределения остаточных напряжений, характеризуются следующими параметрами: $\sigma_{\Pi}^H = 42,4$ МПа; $\sigma_s^H = 64,1$ МПа; $h_{\text{упр}} = 1,9$ мм; $h_{\text{ТЛЛ}} = 0,60$ мм.

Исследование формоизменения детали при интеграции начальных напряжений, возникающих при обработке дробью, в поверхностный слой детали

Большинство работ, посвященных моделированию формоизменения детали в процессе обработки дробью, использует подход, основанный на нагружении детали интегральными силовыми факторами процесса, – растягивающими силами, приложенными на определённой глубине от поверхности [17-21]. Такой подход отличается набором определённых ограничений, а именно не учитывается неравномерность интегрированной эпюры по глубине, что приводит к снижению точности получаемых результатов.

Предлагаемый метод конечно-элементного моделирования, основанный на воссоздании напряженно-деформированного состояния при обработке дробью в поверхностном слое детали, подразумевает дискретизацию сетки детали по глубине слоя, в пределах которого действуют начальные напряжения (**рис. 5**).

Используя интерфейс программы Ansys LS-Dyna, создается модель детали (плоский параллелепипед) размерами 250×30×4 мм, в которую будет вноситься начальное напряженно-деформированное состояние. Конечно-элементная сетка данной детали делится на две части: уточненную сетку и разреженную. Для интеграции начального

напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой необходимо послойно создать группы элементов для всего поверхностного слоя. Затем для соответствующих групп узлов указываются значения трех компонент напряжений и деформаций относительно принятой декартовой системы координат.

Таким образом формируется конечно-элементная сетка с напряженным поверхностным слоем (рис. 6).

В результате расчета начальные напряжения в детали перераспределяются и вызывают действие, эквивалентное приложению осевой силы и изгибающего момента, что приводит к общей изгибной деформации детали. На рис. 7 показаны результаты расчета после перераспределения начальных напряжений и перехода в остаточное напряженно-деформированное состояние в виде распределений перемещений относительно трех декартовых осей.

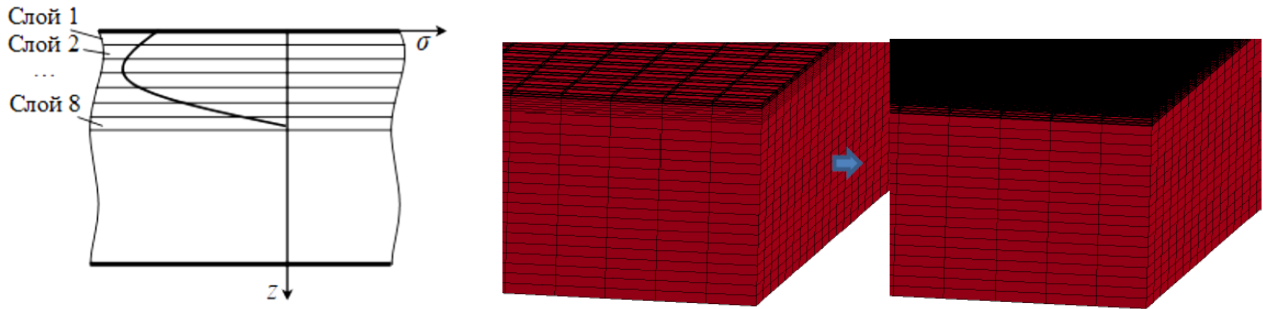


Рис. 5. Дискретизация распределения начального напряженно-деформированного состояния
 Fig. 5. Discretization of the distribution of the initial stress-strain state

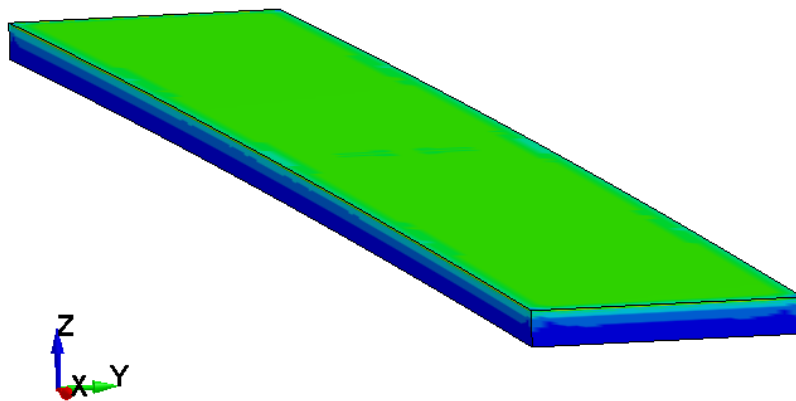


Рис. 6. Конечно-элементная сетка с напряженным поверхностным слоем
 Fig. 6. Finite element mesh with a stressed surface layer

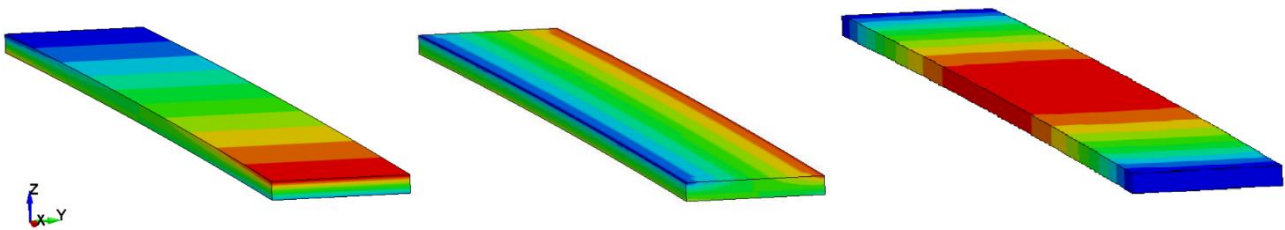


Рис. 7. Распределения перемещений узлов детали относительно осей X, Y, Z соответственно
 Fig. 7. Distributions of displacements of workpiece nodes relative to the X, Y, Z axes, respectively

Экспериментальная проверка результатов моделирования

Для проверки результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования обработки образцов пластин размерами 4×30×250 мм из материала В95пчГ2, используемого при моделировании на установке УДФ-4 на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация “Иркут”». Механические свойства пластин для контроля процесса дробеударной обработки: временное сопротивление – 530 МПа; предел текучести – 460 МПа; относительное удлинение – 7%; твердость – 150 МПа. В качестве рабочего органа использовался дробеметный аппарат ЗД400м. Режимы обработки были выбраны согласно модели.

Критерием оценки была стрела прогиба образца после обработки, измеряемая микрометрической индикаторной планкой.

Расхождения экспериментальных данных и результатов моделирования не превысили 10%, что позволяет судить об адекватности разработанной методики моделирования процессов дробеударного формообразования методом интеграции начального напряженно-деформированного состояния в поверхностный слой детали.

Заключение

Разработанная методика позволяет определять формоизменение деталей таких типов поверхностного пластического деформирования и локального деформирования, как обработка дробью, дробеметное упрочнение, раскатка / посадка / разводка подкрепляющих конструктивных элементов и другие виды механической обработки. Входными данными для проведения расчетов, связанных с определением формоизменения детали, являются распределения начальных компонент напряжений и деформаций, определяемых по результатам конечно-элементного единичного моделирования рассматриваемых процессов.

Список источников

1. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012100.
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A. On Creating Digital Technologies for the Production of Large Aircraft Frame and Skin Parts // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. Vol. 2021. No 13. P. 1777-1785. DOI: 10.1134/S003602952113022X.
3. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1061. DOI: 10.1088/1757-899X/1061/1/012029.
5. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
6. Беляков В.И. Штамповка на специальном оборудовании. М.: Машгиз, 1983. 79 с.
7. Охрименко Я.М. Основы технологии горячей штамповки. М.: Машгиз, 1975. 285 с.
8. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки малоожестких деталей методами местного пластического деформирования // *Материалы Всерос. науч.-практ. семинара с междунар. участием*. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 117-121.
9. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки малоожестких деталей раскаткой роликами // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. №6. С. 404-408.
10. Кравченко Г.Н. Обоснование эффективности восстановления усталостной долговечности поверхностно-упрочненных авиационных деталей повторным упрочнением дробью // *Вестник машиностроения*. 2019. №12. С. 69-75.
11. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
12. Исаев А.И., Овсенко А.Н. Выбор оптимальной толщины образца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое // *Вестник машиностроения*. 1967. № 8. С. 74-76.
13. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования / Пашков А.Е., Чапышев А.П., Пашков А.А., Викулова С.В., Андрияшина Ю.С. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. №12. С. 43-54. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55.
14. Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology // *7-th Int. Conf. on Shot Peening*. Warsaw, Poland, 28-30 Sept. 2000. P. 1-18. С. 1528-1535.
15. Дияк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. №12. С. 19-25.
16. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming // *Mate-*

- rials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. Iss. 4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>.
17. Макарук А.А., Минаев Н.В. Повышение эффективности формообразования и правки мало жестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 63-70.
 18. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization // *Advances in Engineering Software*. 2015. Vol. 79. P. 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>.
 19. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque 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. P. 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>.
 20. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shotpeened Almen strips // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014. Vol. 136. No. 4. <https://doi.org/10.1115/1.4028006>.
 21. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 319. P. 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>.
- ### References
1. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Samoylenko O.V. Increasing the shape accuracy of the hardened parts of the frame by technological methods. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*, 2019, 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012100
 2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A. On creating digital technologies for the production of large aircraft frame and skin parts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, 2021, 13, 1777-1785. DOI: 10.1134/S003602952113022X
 3. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*, 2019, 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104
 4. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*, 2021, 1061. DOI: 10.1088/1757-899X/1061/1/012029
 5. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*, 2019, 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>
 6. Belyakov V.I. *Shtampovka na spetsialnom oborudovanii* [Stamping on special equipment]. Moscow: Mashgiz, 1983, 79 p. (In Russ.)
 7. Okhrimenko Ya.M. *Osnovy tekhnologii goryachey shtampovki* [Basics of die forging technology]. Moscow: Mashgiz, 1975, 285 p. (In Russ.)
 8. Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by local plastic deformation methods. *Materialy Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo seminaru s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Workshop with an international participation]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2011, pp. 117-121. (In Russ.)
 9. Makaruk A.A., Minaev N.V. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6, pp. 404-408. (In Russ.)
 10. Kravchenko G.N. Rationale for efficiency of restoring the fatigue life of surface hardened aircraft parts by repeated shot peening. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2019, no. 12, pp. 69-75. (In Russ.)
 11. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p. (In Russ.)
 12. Isaev A.I., Ovseenko A.N. Selecting optimal thickness of samples for determining residual stresses in the surface layer. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1967, no. 8, pp. 74-76. (In Russ.)
 13. Pashkov A.E., Chapyshev A.P., Pashkov A.A., Vikulova S.V., Andryashina Yu.S. Determination of internal force factors of the shot peening process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 12, pp. 43-55. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
 14. Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single piece wing skin utilization via advanced peen forming technology. The 7th Int. Conf. on Shot Peening, Warsaw, Poland, 28-30 Sept. 2000, p. 1-18, pp. 1528-1535.
 15. Diyak A.Yu. Shot coverage degree estimation by a computer-aided method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12, pp. 19-25. (In Russ.)
 16. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*, 2018, 327(4). DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042125
 17. Makaruk A.A., Minaev N.V. Improving efficiency of low-rigid ribbed parts forming and straightening by roller burnishing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12 (107), pp. 63-70. (In Russ.)
 18. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for shot peening parameter optimization. *Advances in Engineering Software*, 2015, 79, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>

19. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40(10), 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
20. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014, 136 (4). <https://doi.org/10.1115/1.4028006>
21. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P. et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 319, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

Поступила 10.10.2022; принята к публикации 02.11.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 10/10/2022; revised 02/11/2022; published 22/12/2022

Пашков Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: pashkov@istu.edu.

Пашков Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: pashk0ff@mail.ru.

Самойленко Олег Викторович – научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
E-mail: olegsamoylenko1@gmail.com.

Andrey E. Pashkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashkov@istu.edu.

Aleksandr A. Pashkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashk0ff@mail.ru.

Oleg V. Samoylenko – Researcher of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: olegsamoylenko1@gmail.com.