

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 669.715

EDN: QAHLRO

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-202-213



Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом»

Чи Винь Ле¹, В.П. Кольцов², Д.А. Стародубцева³✉¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали из алюминиевого сплава VT95 при дробеударной обработке и последовательности операций «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом». Объектами исследования являются крупногабаритные детали типа панелей и обшивок сложной формы, применяемые в самолето-, ракето- и судостроении. При разработке методики определения остаточных напряжений использовалось компьютерное моделирование в программном комплексе Ansys Workbench 19.0. В результате моделирования изучаемых процессов обработки получено наглядное представление характера формирования остаточных напряжений, физические значения и графики распределения последних. Установлено, что характер распределения остаточных напряжений после выполнения двух видов обработки схож. Максимальное значение остаточных напряжений, полученных в результате дробеударной обработки поверхности детали дробью диаметром 3,0 мм при скорости удара дробы 25 м/с, достигает порядка 600 МПа при глубине залегания 1,0 мм. После дробеударной обработки выполняется зачистка лепестковым кругом, в конечно-элементном моделировании, представленном в виде набора абразивных зерен со скоростью 18,316 м/с. Показано, что удаление в процессе зачистки с поверхности пластины слоя 25, 50 и 75 мкм способствует срезанию верхней части эпюры остаточных напряжений и, как следствие, к уменьшению значений остаточных напряжений в технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка» до 400 МПа. Также установлено, что по мере увеличения толщины снятого с поверхности детали слоя при зачистке величина остаточных напряжений сокращается медленнее. При этом независимо от толщины снимаемого слоя при зачистке, глубина залегания сжимающих остаточных напряжений практически не изменена (около 0,7 мм). Разработанная конечно-элементная модель позволяет прогнозировать и контролировать уровень и величину остаточных напряжений в образце из алюминиевого сплава еще на стадии технологической подготовки для операций «дробеударная обработка», а также сочетание операций «дробеударная обработка – зачистка».

Ключевые слова: обработка дробью, дробеударная обработка, зачистка лепестковым кругом, отпечатки дробы, остаточные напряжения

Для цитирования: Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом» // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 202–213. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213>. EDN: QAHLRO.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment–flap-wheel trimming

Tri Vinh Le¹, Vladimir P. Koltsov², Daria A. Starodubtseva³✉¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper aims to study the stress-strain state of the surface layer in a VT95 aluminum alloy part during its shot-impact treatment in the sequence of “shot-impact treatment–flap-wheel trimming” operations. The research objects included large parts, such as panels and cladding of complex shapes used in aircraft, missile, and

shipbuilding industries. Computer simulation in the Ansys Workbench 19.0 software package was used to develop a methodology for determining residual stresses. As a result of simulating the studied treatment sequence, a visual representation of the residual stress formation pattern, as well as physical values and distribution curves of residual stresses, were obtained. The distribution pattern of residual stresses after performing two types of treatment was established to be similar. The maximum value of residual stresses, obtained as a result of performing a shot-impact treatment of the part surface with a shot of 3.0 mm in diameter at a shot-impact rate of 25 m/s, reaches about 600 MPa at a depth of 1.0 mm. Following the shot-impact treatment, flap-wheel trimming is performed in the finite element simulation as a set of abrasive grains at a rate of 18.316 m/s. The removal of the 25-, 50-, and 75- μm layer from the surface of the plate during trimming contributes to the shearing of the upper part in the residual stress diagram and, as a result, to a decrease in the values of residual stresses in the shot-impact treatment–flap-wheel trimming sequence to 400 MPa. In addition, along with an increase in the thickness of the layer removed from the surface during trimming, the value of residual stresses decreases more slowly. In this case, the thickness of the removed layer causes no effect on the depth of residual compression stresses (about 0.7 mm). The developed finite element model makes it possible to predict and control the level and magnitude of residual stresses in an aluminum alloy sample at the stage of its preparation for both a shot-impact treatment operation and the combination of shot-impact treatment and flap-wheel trimming.

Keywords: shot processing, shot peening, grinding with a flap wheel, shot indents, residual stresses

For citation: Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A. Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment–flap-wheel trimming. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):202-213. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213>. EDN: QAHLRO.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления криволинейных панелей и обшивок крыла самолета уже многие годы успешно применяется комплексная технология дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом. Вследствие ударного воздействия дроби на поверхности обрабатываемой детали образуется множество отпечатков дроби, расположенных в хаотичном порядке с различными диаметрами и глубиной [1–4]. На рис. 1 представлено типичное изображение сканированного участка поверхности экспериментального

образца, изготовленного из алюминиевого сплава В95 после дробеударной обработки на фактическом режиме производственного процесса дробеударного формообразования обшивок крыла самолета. На рис. 1 хорошо видны следы в виде борозд, образованных в результате фрезерования поверхности до обработки дробью, и отпечатки дроби в виде окружностей различного размера, полученные в результате воздействия дроби. При этом установлено, что самый большой отпечаток дроби на исследуемом участке поверхности имеет глубину до 40 мкм.

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	27.869	nm
Data Points	31084769.28	
Percent Data Points	99.87	%
Ra	3.981	μm
Rp	18.711	μm
Rq	5.074	μm
Rt	59.959	μm
Rv	-41.249	μm

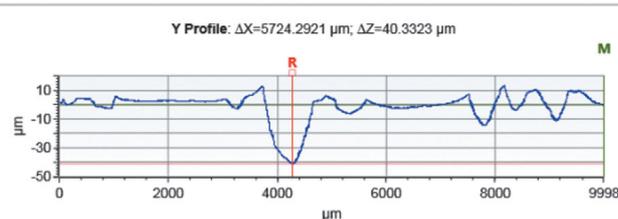
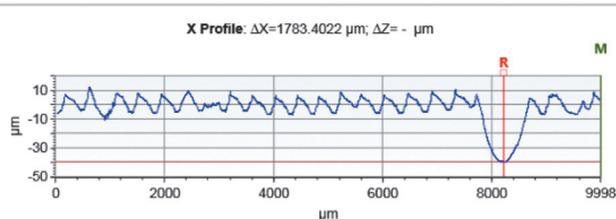
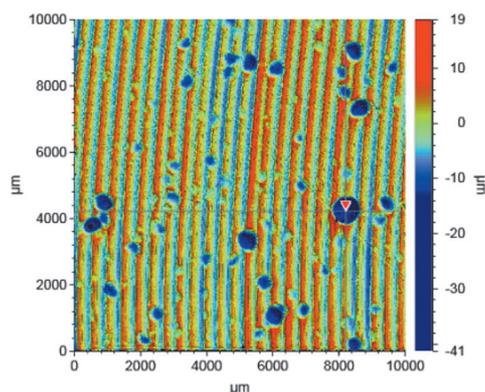


Рис. 1. Изображение сканированного участка поверхности образца после дробеударной обработки
Fig. 1. An image of the scanned area of the shot peened sample surface

Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	0.16	μm
Data Points	7550472.192	
Percent Data Points	99.77	%
Ra	2.633	μm
Rp	16.295	μm
Rq	3.54	μm
Rt	46.879	μm
Rv	-30.584	μm

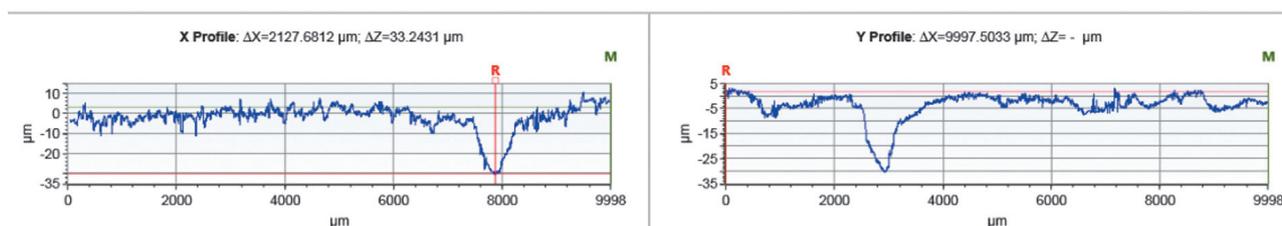
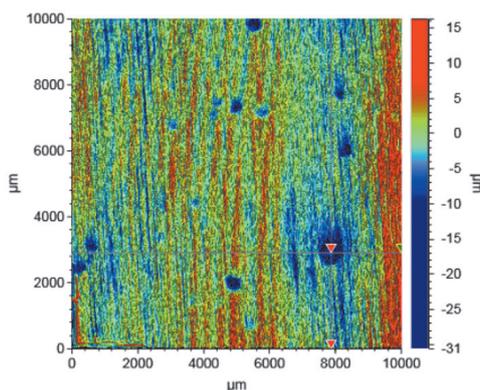


Рис. 2. Изображение сканированного участка поверхности образца, обработанного дробью с последующей зачисткой лепестковым кругом

Fig. 2. An image of the scanned area of the shot peened sample surface subsequently grinded with a flap wheel

На рис. 2 представлено типичное изображение сканированного участка поверхности этого же образца после дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом. Несмотря на значительное снижение шероховатости от Ra 3,981 до Ra 2,633 (рис. 1, 2), достигнутой при снятии слоя 10 мкм в результате зачистки, глубина самого крупного отпечатка на исследуемом участке поверхности – 30,584 мкм (исходная глубина до зачистки 41,249 мкм).

Наличие отпечатков дроби с различными глубинами и диаметрами на поверхности после дробеударной обработки объясняется различной скоростью удара и углами атаки дроби об обрабатываемую поверхность, а также случаями соударения дроби падающего и встречного потока в результате ее отскока и т.д.

При дробеударной обработке в верхнем слое поверхности детали происходит пластическая деформация материала, в результате в поверхностном слое детали под отпечатками дроби возникают остаточные напряжения, которые создают изгибающие моменты, способствующие приданию панелям и обшивкам требуемой формы. После удаления некоторого поверхностного слоя зачисткой лепестковым кругом напряженно-деформированное состояние данного слоя изменяется, что приведет к возможному изменению

формы дробеобработанной поверхности детали [5–10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование классических методов определения остаточных напряжений при дробеударной обработке (внедрении индентора) требует применения достаточно сложного математического аппарата и не менее трудоемких экспериментов. Поэтому получение достоверных, надежных и обобщенных методик о влиянии остаточных напряжений в упрочненных деталях с концентраторами напряжений является весьма актуальной научной задачей.

Отечественные и зарубежные публикации по теме исследования показали, что проблеме определения остаточных напряжений в упрочненных деталях с концентраторами напряжений уделяется недостаточно внимания, что связано со сложностью данной проблематики и трудностями как теоретического, так и экспериментального характера [11–22].

Целью работы является разработка методики определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали, вызванных ударами дроби и последующей зачисткой лепестковым кругом, что имеет весьма актуальное и важное значение при изготовлении панелей и обшивок крыла самолета.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для моделирования процесса дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом применялась компьютерная программа для инженерного анализа Ansys Workbench 19.0, в которой расчет выполняется методом конечных элементов. Конечно-элементная модель дробеударной обработки и зачистки лепестковым кругом, а также расчеты и анализ остаточных напряжений проведены в модуле Explicit Dynamics (явная динамика).

На практике при изготовлении панелей и обшивок дробеударное формообразование выполняется с невысокой степенью покрытия поверхности отпечатками дроби (соотношение площади отпечатков дроби исследуемого участка поверхности к общей площади исследуемой поверхности детали) до 30%. Вследствие последнего достаточно редко можно встретить случай перекрытия отпечатков дроби на поверхности детали (см. рис. 1). Поэтому частным случаем изучения характера формирования остаточных напряжений процесса дробеударного формообразования может быть изучение характера единичного удара дроби о поверхность, и как следствие единичный отпечаток дроби.

На рис. 3 представлена конечно-элементная модель процесса дробеударной обработки поверхности с последующей зачисткой лепестковым кругом [23]. В качестве обрабатываемой детали построена пластина с габаритными размерами 1,5×2×3 мм, материал пластины выбран из библиотеки каталога материалов программы Ansys Workbench 19.0 – AL7075-T6 (аналог алюминиевого сплава ВТ95, применяемого для изготовления панелей и обшивок). В качестве дроби смоделирована сфера диаметром 3 мм (шарик), представляющая собой абсолютно жесткое и гладкое тело. Размер сферы выбран исходя из используемой на производстве дроби при формообразовании панелей и обшивок крыла самолета. В качестве абразивного инструмента (лепесткового круга) смоделированы 8 зерен абразива в форме равносторонней треугольной призмы. Размер каждой из сторон призмы – 270 мкм, что соответствует среднему размеру зерна абразива из электрокорунда зернистостью Р25 (размер зерна для данной зернистости лежит в пределах от 250 до 315 мкм)⁴.

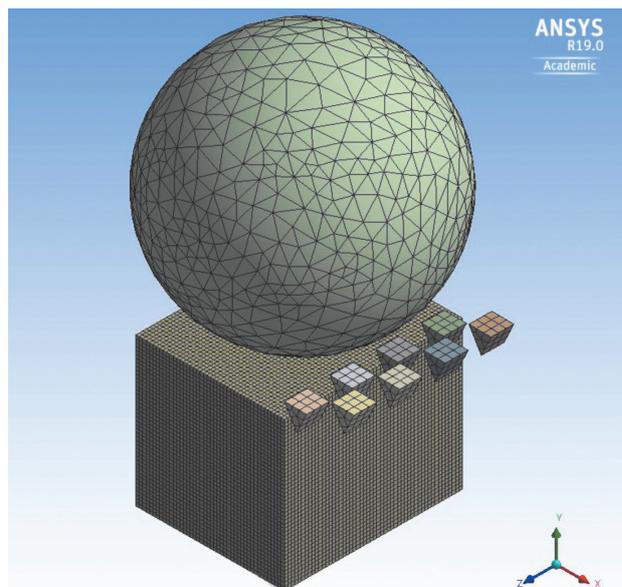


Рис. 3. Конечно-элементная модель процесса дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом

Fig. 3. Finite element model of the shot peening process with subsequent grinding with a flap wheel

Форма абразивного зерна задана в виде равносторонних треугольных призм исходя из следующих соображений. В процессе зачистки лепестковым кругом, при достаточно высокой частоте вращения, лепесток изгибается, и контакт каждого зерна с поверхностью детали происходит по направлению движения лепесткового круга на достаточно малом участке, оставляя после движения не протяженной длины риску. Как установлено из предварительно выполненного моделирования, глубина рисков, форма полученной риски и величины остаточных напряжений при внедрении абразивных зерен различной формы несущественно отличаются. Однако использование в качестве модели абразивного зерна зерно принятой формы (в виде равносторонних треугольных призм) показало наилучший результат расчета программы и анализа (без уведомления об ошибках) и значительно меньшее время расчета.

Несмотря на хаотическое расположение абразивных зерен на лепестке круга, при контакте лепестка с поверхностью детали он изгибается, и пространство между абразивными зернами, например, первого ряда лепестка, перекрывают другие зерна последующих рядов или последующих лепестков.

⁴Димов Ю.В. Обработка эластичным инструментом и свободным абразивом: учеб. пособ. Иркутск: ИРНИТУ, 2017. 202 с.

Поэтому для упрощения модели принято решение создать два ряда зерен абразива, принятых за одну партию абразива, так, чтобы зерна второго ряда горизонтально перекрывали пространство между зернами первого ряда (см. рис. 2). Кроме того, зерна расположены на равной глубине 25 мкм (в качестве припуска на зачистку) при угле наклона 60° к поверхности пластины.

Конечно-элементная модель пластины лишена всех степеней свободы в нижней плоскости, что не позволяет ей перемещаться. Остальные 4 боковые стороны пластины лишены перемещения по нормальному направлению для обеспечения симметрии деформации при исследовании модели.

В качестве нагрузки, вызванной ударом дроби в процессе дробеударной обработки, выбрана начальная скорость удара дроби 25 м/с (в соответствии с окружной скоростью дроби при вылете из дробеметного колеса дробеударной установки УДФ-4), которая приложена к шарикю по направлению, нормальному к поверхности пластины.

Абразивные зерна лишены перемещения по направлениям осей OZ и OY, переме-

щение происходит только по направлению оси OX с постоянной скоростью 18,316 м/с, что соответствует окружной скорости лепесткового круга диаметром 350 мм при частоте вращения привода круга 1000 об/мин.

Исследование проведено для 4-х различных случаев. В первом случае – удар шарика по пластине без воздействия абразивных зерен, последующие 3 случая соответствуют удару шарика и движению первой, второй и третьей партий абразивных зерен по очереди с глубиной внедрения в пластину 25, 50 и 75 мкм соответственно. При этом модель построена таким образом, что после каждого удара дроби о поверхность и удаления с поверхности пластины слоя материала было достаточно количество времени для восстановления в пластине упругой деформации.

Генерация сетки конечных элементов выполнена автоматически в программе Ansys. Для успешного снятия конкретной величины слоя материала с поверхности пластины при зачистке размер элементов выбран кратным величине толщины снимаемого слоя (в исследуемом случае 25 мкм).

На рис. 4 представлен результат напря-

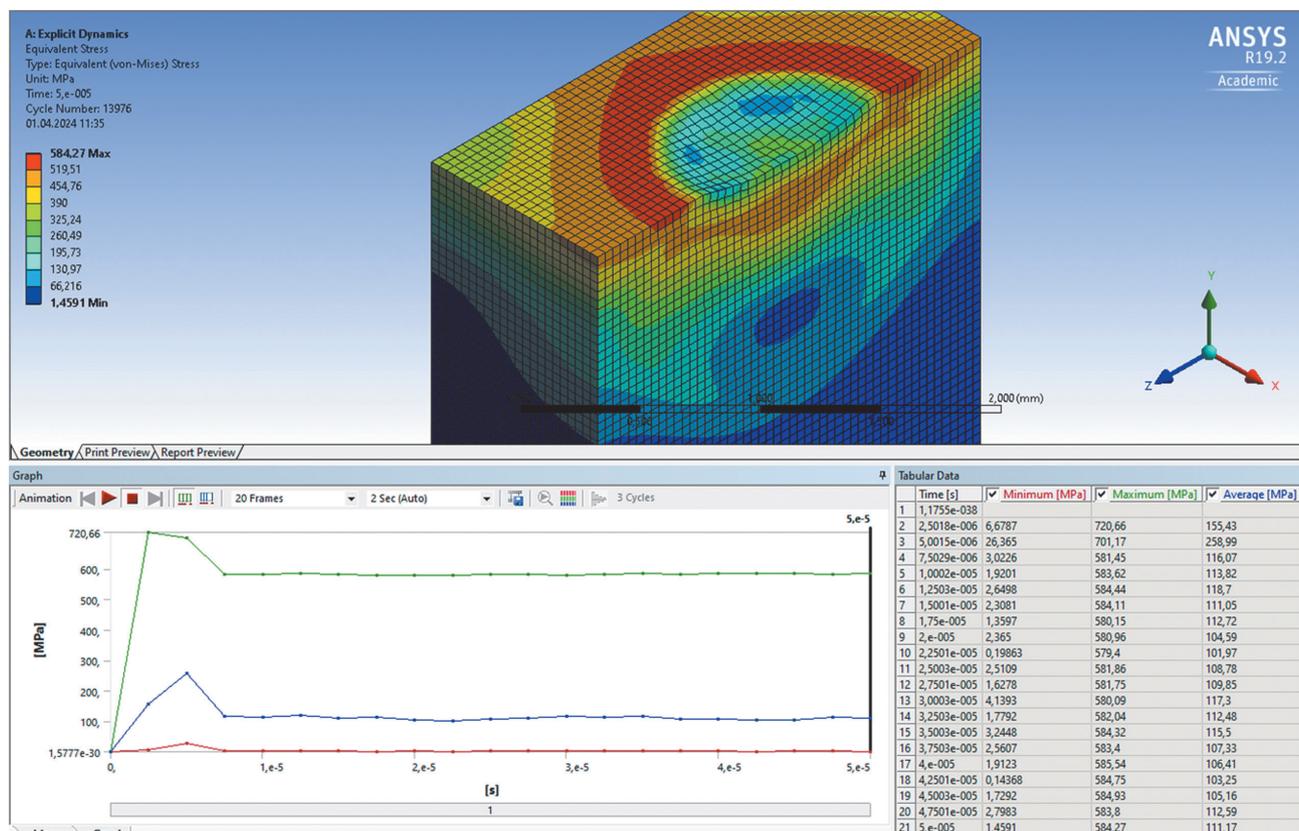


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика
Fig. 4. Stress-strain state of the plate after the ball impact

женно-деформированного состояния пластины в сечении, проходящем через центр шарика после удара, полученный в программе инженерного анализа Ansys. Глубина отпечатка шарика после удара составила 75 мкм.

На рис. 5 представлено напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика и последующей зачистки абразивным зерном со снятием 3-х слоев материала с поверхности пластины по 25 мкм каждого в том же поперечном сечении, как на рис. 4.

Проанализировав данные рис. 4 и 5, следует, что распределение напряжений и деформаций пластины, а также их значения в первом случае, в зоне отпечатка после удара шарика, и во втором – после удара шарика с последующим снятием слоя абразивными зернами – изменилось, что свидетельствует о переформировании в результате абразивной зачистки напряженно-деформированного поверхностного слоя.

Для получения конкретных значений напряжений и деформаций по глубине залегания исследуемой пластины возле отпечатка

шарика необходимо создать линию маршрута (Path), начиная с поверхностного узла отпечатка шарика до узла рассматриваемой глубины (в данном случае на толщине 2,6 мм) по направлению оси OY. Созданная линия должна быть привязана к узлам конечных элементов. На рис. 6 представлена данная линия маршрута после привязки с путевыми узлами конечных элементов (всего 49 узлов) и генерация напряжений и деформаций, и по узлам в ней, а также график изменения остаточных напряжений по глубине залегания внутри пластины.

Так как в процессе эксплуатации панели и обшивки в авиационной технике работают на изгиб, главные и нормальные остаточные напряжения в поперечном сечении детали вызывают особый интерес к их исследованию. На рис. 7 представлены графики изменений средних значений главных напряжений по глубине залегания после удара шарика (ряд 1), после удара шарика и зачисткой первой партией абразивных зерен (ряд 2), двумя партиями абразивных зерен (ряд 3) и

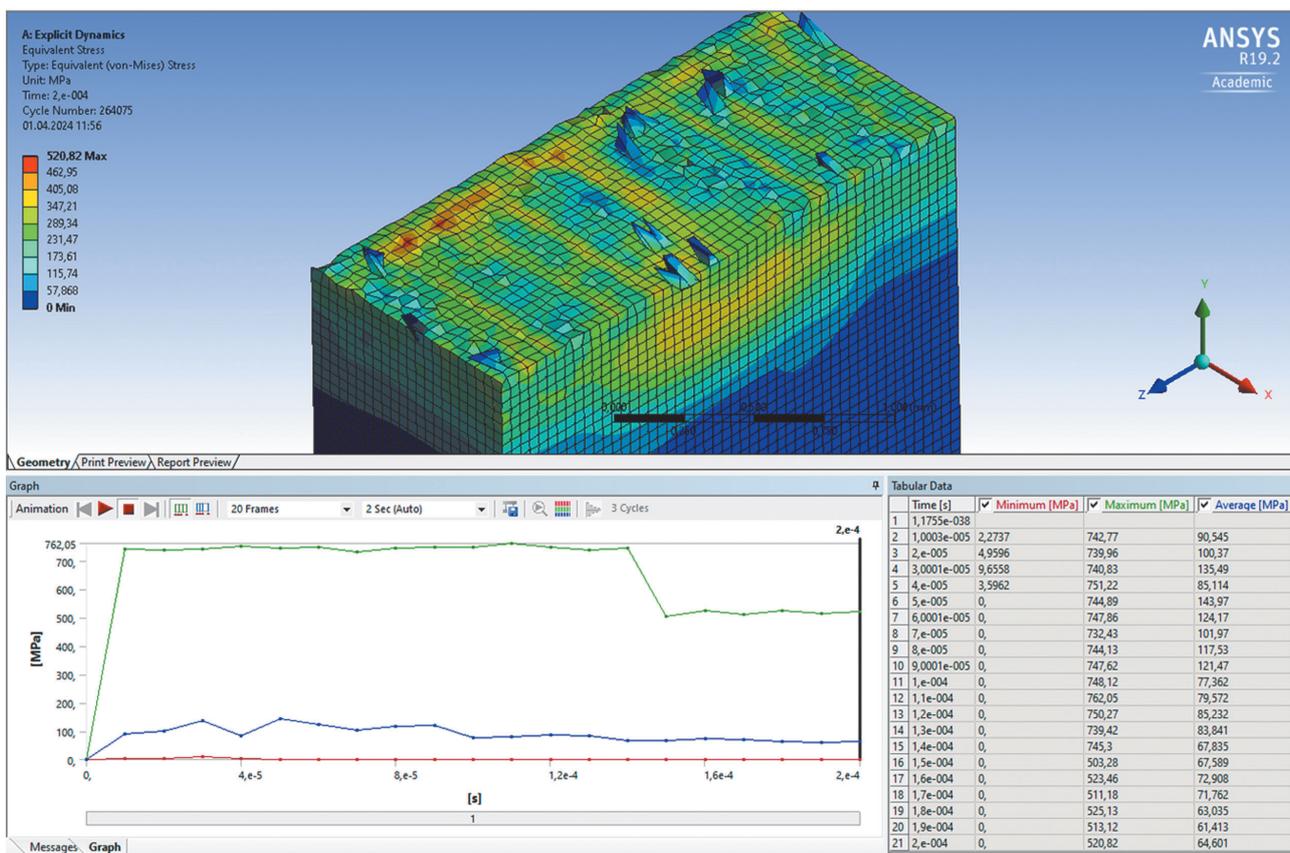


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика и зачистки тремя последовательными партиями абразивных зерен со снятием 25 мкм каждой

Fig. 5. Stress-strain state of the plate after the ball impact and grinding with three consecutive batches of abrasive grains with 25 micron removal each

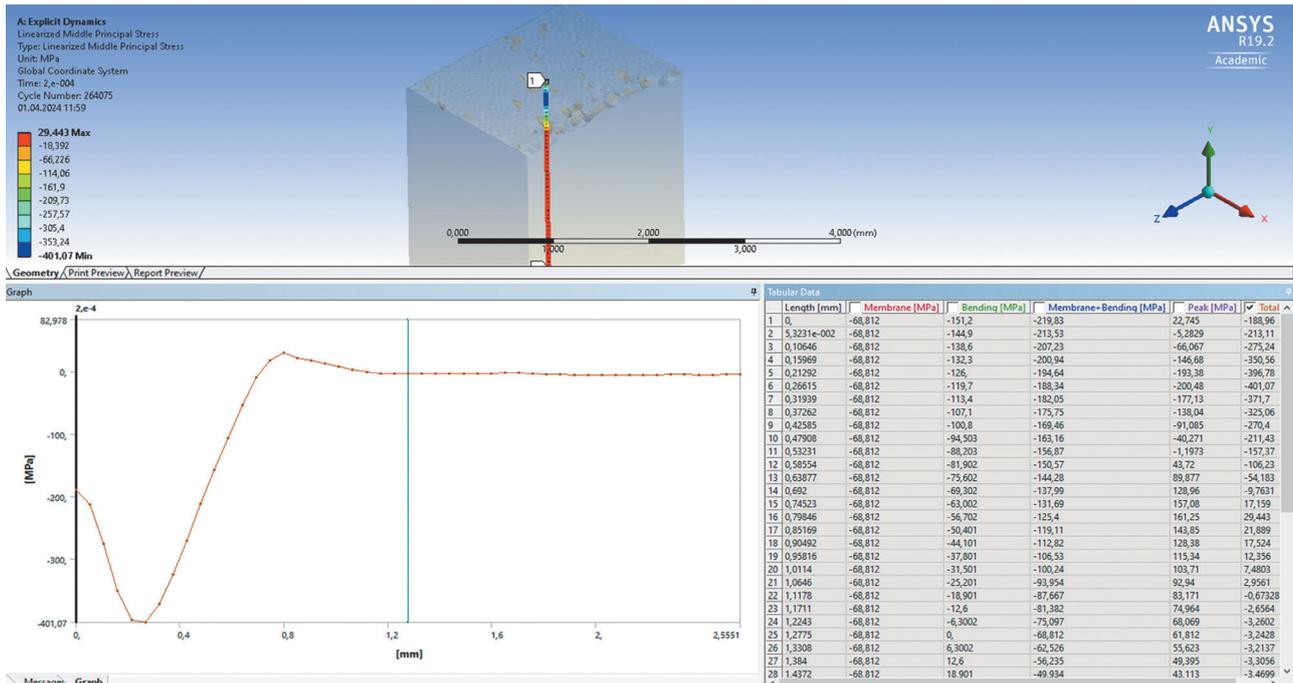


Рис. 6. Создание линии маршрута и генерация остаточных напряжений по построенному маршруту
Fig. 6. Creating a route line and generating residual stresses along the constructed route

трия партиями абразивных зерен (ряд 4), возникающих в пластине под центром дна отпечатка шарика.

Проанализировав данные рис. 7–9, видно, что остаточные напряжения в пластине после удара шарика и удара шарика с по-

следующей зачисткой абразивным зерном имеют различное распределение по глубине залегания в пластине. Однако общая конфигурация распределения остаточных напряжений сохраняется в том, что в самом верхнем слое пластины они сжимающие (с отрицатель-

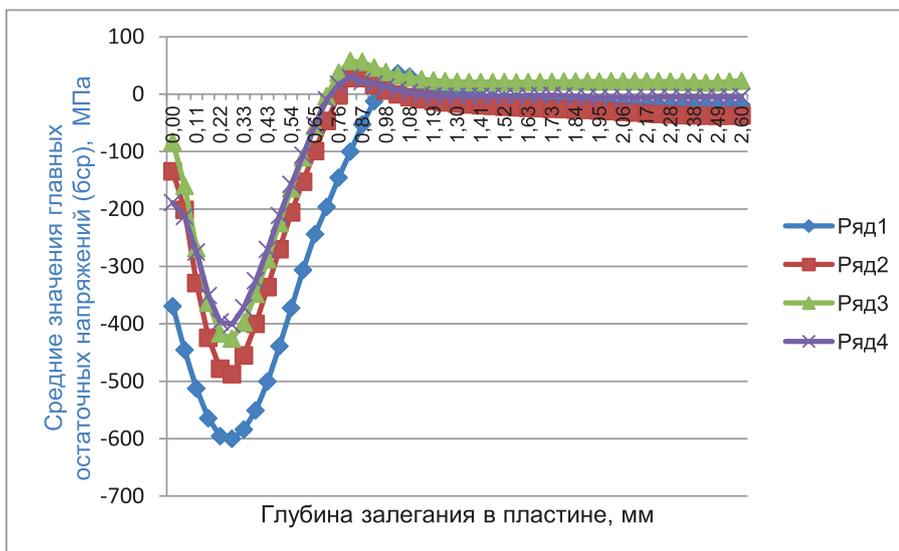


Рис. 7. Средние значения главных остаточных напряжений по глубине залегания в пластине под центром дна отпечатка шарика, где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен

Fig. 7. Average values of the main residual stresses by the plate depth under the center of the ball indent bottom, where 1 row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains

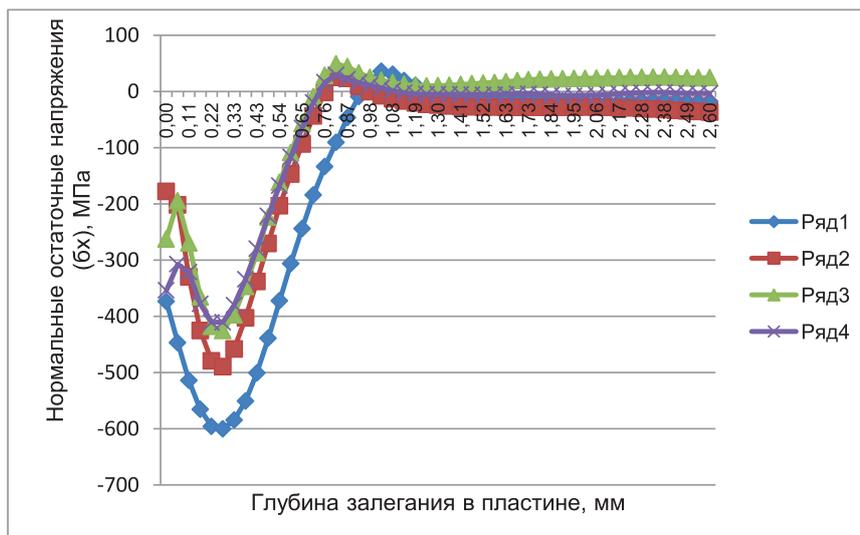


Рис. 8. Нормальные остаточные напряжения в пластине под центром дна отпечатка шарика в поперечной плоскости (YOZ), где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен

Fig. 8. Normal residual stresses in the plate under the center of the ball indent bottom in the transverse plane (YOZ), where 1 row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains

ным знаком), а далее растягивающие (с положительным знаком), и чем глубже в пластине, тем стремительнее приближаются к нулю.

Значения сжимающих напряжений после удара шарика о пластину существенно

уменьшаются с выполнением зачистки первой партией абразивных зерен (на более 100 МПа при снятии слоя 25 мкм абразивным зерном). С последующим же выполнением зачистки второй и третьей партиями

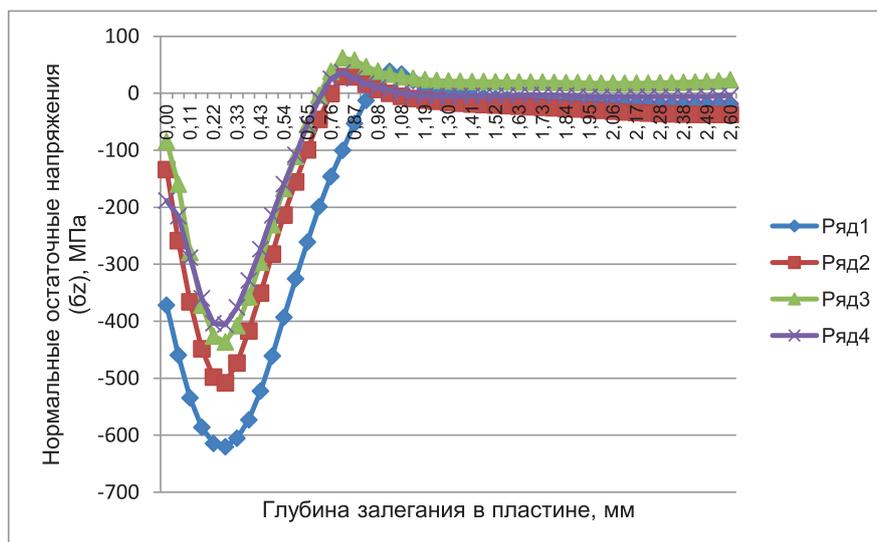


Рис. 9. Нормальные остаточные напряжения в пластине под центром дна отпечатка шарика в поперечной плоскости (XOY), где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен

Fig. 9. Normal residual stresses in the plate under the center of the ball indent bottom in the transverse plane (XOY), where 1 row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains

абразивных зерен максимальные значения сжимающих напряжений уменьшаются не так существенно (при последующем снятии слоя материала порядка 50 мкм абразивным зерном максимальное значение сжимающих остаточных напряжений составило около 100 МПа).

Максимальные значения растягивающих напряжений несущественно меняются как после удара шарика, так и после удара шарика с одной, двумя и тремя операциями зачистки. После удара шарика и последующей зачисткой одним, двумя и тремя партиями абразивных зерен глубина залегания сжимающих остаточных напряжений имеет близкое значение. Однако на рис. 7–9 хорошо видно, что глубина залегания сжимающих остаточных напряжений после удара шарика и после удара с выполнением зачистки во всех рассматриваемых случаях отличается на одинаковую величину.

Таким образом, образованные после зачистки лепестковым кругом поверхности, предварительно обработанной дробью, остаточные напряжения приводят к их перераспределению по глубине и уменьшению значений, полученных после обработки дробью, как по абсолютному значению, так и по глубине их залегания, но сохраняя при этом форму распределения в поверхностном слое.

В дальнейшем полученные исследования помогут составить базу данных зависимости режимных параметров и полученных значений остаточных напряжений, что в свою очередь позволит сопоставить данные моде-

лирования с экспериментальными данными и уменьшить количество натуральных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на множество допущений, принятых при моделировании процесса дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом, разработанная конечно-элементная модель в среде программы инженерного анализа Ansys позволяет провести предварительное аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния обрабатываемой детали как для дробеударной обработки, так и для технологической последовательности дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом, учитывая свойства материала детали и технологических параметров процессов, а также условий обработки.

Результаты исследований показали, что остаточные напряжения в зоне отпечатков дроби после дробеударной обработки и дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом, несмотря на сохранение конфигурации распределения по глубине залегания, уменьшились в значении в зависимости от толщины снимаемого слоя материала при зачистке (припуска). Таким образом, для сохранения формы детали после дробеударного формообразования в допустимых пределах при определении припуска на зачистку лепестковым кругом после операции дробеударного формообразования обязательно необходимо учитывать данный факт.

Список источников

1. Асланян И.Р., Бубнов А.С., Емельянов В.И., Исаев А.Н., Зайдес С.А., Копылов Ю.Р. [и др.]. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2014. 560 с. EDN: TJNGHP.
2. Пашков А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 17–22. EDN: TVQUBR.
3. Пашков А.Е., Шматов В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства: сб. ст. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 62–66.
4. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 116–121. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018>. EDN: YXBRRZ.
5. Назаров С.Р., Шодмонкулов З.А. Определение глубины деформационного упрочнения на основе энергетических соотношений дробеударной обработки // LIV Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов: материалы докладов (г. Витебск, 28 апреля 2021 г.). Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2021. Т. 2. С. 279–281. EDN: VXRTFS.

6. Кравченко Г.Н., Кравченко К.Г. Выбор технологических параметров дробеударного упрочнения силовых деталей авиационных конструкций // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 12. С. 37–44. EDN: PJSWFF.
7. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Iss. 1-3. P. 51–63. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>.
8. 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. Iss. 10. P. 1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>.
9. 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. Vol. 136. Iss. 4. P. 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4028006>.
10. Bhuvaraghan V., Srinivasan S.M., Maffeo B., McLain R.D., Potdar Yo., Prakash O. Shot peening simulation using discrete and finite element methods // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Iss. 12. P. 1266–1276. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.003>.
11. Касимов Б.М.У., Муминов М.Р., Шин И.Г. Поверхностное упрочнение деталей технологических оборудований и моделирование напряженного состояния при дробеударной обработке // Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения проф. Н.А. Васильева: сб. науч. тр. (г. Москва, 26 мая 2021 г.). М.: Рос. гос. ун-т им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2021. Т. 1. С. 122–127. EDN: JYSPLZ.
12. Пашков А.Е., Дяк А.Ю. Определение параметров дробеударного формообразования-упрочнения при помощи CAD/CAM/CAE систем // Управление технологическими процессами машиностроительного производства: сб. ст. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 59–62.
13. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов: сб. науч. тр. Волгоград: Волжский политехнический институт, 1977. Вып. 8. С. 58–68.
14. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 52–55. EDN: HTKUGR.
15. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses // Finite Elements in Analysis and Design. 1999. Vol. 31. Iss. 3. P. 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00057-2).
16. Лебеденко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник Донского государственного технического университета. 2008. Т. 8. № 4. С. 202–212. EDN: KPOCUD.
17. Пашков А.А. Моделирование процесса формообразования крупногабаритных деталей двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа // Технология металлов. 2020. № 12. С. 19–28. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2020-0-12-19-28>. EDN: UUAYIZ.
18. Unyanin A.N., Khazov A.V. Cutting ability of abrasive grains in the processing of billets of plastic materials // Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: IOP Conference Series. 2019. Vol. 709. Iss. 2-1. P. 022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022054>. EDN: BYFFES.
19. Lyukshin V.S., Shatko D.B., Strelnikov P.A. Study of the working face of a flexible grinding tool // Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations: IOP Conference Series. 2020. Vol. 734. Iss. 1. P. 12068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012068>. EDN: BJODMK.
20. Baksa T., Adamek P., Hronek O., Zetek M. Degradation of a grinding wheel when grinding cermet materials and its influence on the grinding process // Manufacturing Technology. 2019. Vol. 19. Iss. 1. P. 9–13. <https://doi.org/10.21062/ujep/236.2019/a/1213-2489/MT/19/1/9>.
21. Romanenko A., Shatko D., Nepogozhev A., Strelnikov P. Study of the Influence of the grinding wheel composition components on its performance during ID grinding // Smart Innovation, Systems and Technologies / eds. M. Shamtsyan, M. Pasetti, A. Beskopylny. Singapore: Springer, 2022. Vol. 247. P. 213–222. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23. EDN: BNBMHF.
22. Сапунов В.В., Евстигнеев А.Д., Чистяков В.С. Исследование работоспособности лепестковых шлифовальных кругов при обработке заготовок из алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д-ра техн. наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича (г. Новосибирск, 7–9 октября 2021 г.). Новосибирск: НГТУ, 2021. С. 112–118. EDN: KATTWZ.
23. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Нгуен Минь Хоанг. Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении деталей // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник статей XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 21–26 сентября 2020 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2020. С. 104–112. EDN: JVBPIIT.
24. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Структура формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической последовательности «дробеударное формообразование зачистка» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 56–67. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67>. EDN: VRFUYI.

References

1. Aslanyan I.R., Bubnov A.S., Emel'yanov V.I., Isaev A.N., Zajdes S.A., Kopylov Yu.R., et al. *Part processing by surface plastic deformation: monograph*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, 560 p. (In Russ.). EDN: TJNGHP.
2. Pashkov A.E. On application features of domestic and foreign technology of aircraft skin and panel forming. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;5;17-22. (In Russ.). EDN: TVQUBR.
3. Pashkov A.E., Shmatkov V.S. Features of the shot peening hardening technology for large-sized aircraft parts. In: *Upravlenie tekhnologicheskimi processami mashinostroitel'nogo proizvodstva = Control of machine-building production technological processes*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1998, p. 62-66. (In Russ.).
4. Grebennikov D.S., Maksimenkov V.I. Shaping wing panels of a long-haul aircraft. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(1):116-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018>. EDN: YXBRZ.
5. Nazarov S.R., Shodmonkulov Z.A. Determination of the strain hardening depth based on energy relations of shot-impact processing. *LIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya prepodavatelej i studentov: materialy dokladov = LIV International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: materials of reports*. 28 April 2021, Vitebsk. Vitebsk: Vitebsk State Technological University; 2021, vol. 2, p. 279-281. (In Russ.). EDN: VXRTFS.
6. Kravchenko G.N., Kravchenko K.G. Selection of technological parameters of shot blasting hardening of power parts of aircraft structures. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*. 2018;12:37-44. (In Russ.). EDN: PJSWFF.
7. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2001;14(1-3):51-63. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>.
8. 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;40(10):1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>.
9. 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):041002. <https://doi.org/10.1115/1.4028006>.
10. Bhuvaraghan B., Srinivasan S.M., Maffeo B., McClain R.D., Potdar Yo., Prakash O. Shot peening simulation using discrete and finite element methods. *Advances in Engineering Software*. 2010;41(12):1266-1276. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.003>.
11. Kasimov B.M.U., Muminov M.R., Shin I.G. Surface hardening of parts of technological equipment and modeling of stress state during shot-shot processing. In: *Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora N.A. Vasil'eva = Collected scientific works of the International scientific conference dedicated to the 150th birth anniversary of professor N.A. Vasiliev*. 26 May 2021, Moscow. Moscow: Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art); 2021, vol. 1, p. 122-127. (In Russ.). EDN: JYSPLZ.
12. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. Determining shot peening parameters of shaping – hardening using CAD/CAM/CAE systems. In: *Upravlenie tekhnologicheskimi processami mashinostroitel'nogo proizvodstva = Control of machine-building production technological processes*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1998, p. 59-62. (In Russ.).
13. Drozd M.S., Osipenko A.P. Analytical study of the stress state under elastic sphere introduction into an elastoplastic half-space. In: *Metallovedenie i prochnost' metallov: sbornik nauchnyh trudov = Metal science and strength of metals: collected scientific works*. Volgograd: Volga Polytechnic Institute; 1977, iss. 8, p. 58-68. (In Russ.).
14. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskii S.L. Predicting parameters of machine part hardening by surface plastic deformation. *Scientific Journal "Bulletin of the Technological University"*. 2005;3:52-55. (In Russ.). EDN: HTKUGR.
15. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design*. 1999;31(3):179-191. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00057-2).
16. Lebedenko V.G. The mathematical description of process of formation of geometrical parameters of the superficial layer and hardening at processing details in fraction. *Vestnik of Don State Technical University*. 2008;8(4):202-212. (In Russ.). EDN: KPOCUD.
17. Pashkov A.A. Simulation of shaping process of large-sized bi-curvature components on shotblast units of contact type. *Tekhnologiya metallov*. 2020;12:19-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2020-0-12-19-28>. EDN: UUYAYZ.
18. Unyanin A.N., Khazov A.V. Cutting ability of abrasive grains in the processing of billets of plastic materials. In: *Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: IOP Conference Series*. 2019;709(2-1):022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022054>. EDN: BYFFES.
19. Lyukshin V.S., Shatko D.B., Strelnikov P.A. Study of the working face of a flexible grinding tool. In: *Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations: IOP Conference Series*. 2020;734(1):12068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012068>. EDN: BJODMK.
20. Baksa T., Adamek P., Hronek O., Zetek M. Degradation of a grinding wheel when grinding cermet materials and its influence on the grinding process. *Manufacturing Technology*. 2019;19(1):9-13. <https://doi.org/10.21062/ujep/236.2019/a/1213-2489/MT/19/1/9>.
21. Romanenko A., Shatko D., Nepogozhev A., Strelnikov P. Study of the Influence of the grinding wheel composition components on its performance during ID grinding. In: Shamshtyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds.). *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer; 2022, vol. 247, p. 213-222. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23. EDN: BNBMHF.
22. Sapunov V.V., Evstigneev A.D., Chistyakov V.S. Studying flap grinding wheel performance when processing workpieces made of aluminum alloys. In: *Innovacii v mashinostroenii: sbornik trudov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy*

konferencii, posvyashchennoj pamyati doktora tekhnicheskikh nauk, professora Rahimyanova Harisa Magsumanovicha = Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12th International scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of technical sciences, Professor Kharis Magsumanovich Rakhimyanov. 7–9 October 2021, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021, p. 112-118. (In Russ.). EDN: KATTWZ.

23. Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Nguen Min' Hoang. Modeling the formation of the main parameters of the surface layer quality under part shot peening. In: Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej XIV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Aircraft engineering and transport of Siberia: collected articles of the 14th International scientific and technical conference. 21–26 September 2020, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020, p. 104-112. (In Russ.). EDN: JVBPIIT.

24. Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Formation structure of surface roughness parameters at “shot peen forming – grinding” technological sequence implementation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):56-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67>. EDN: VRFUYI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Чи Винь,

к.т.н.,
доцент кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
vinh_istu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0680-9009>

Кольцов Владимир Петрович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
kolcov@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-6924-9504>

Стародубцева Дарья Александровна,

к.т.н.,
доцент кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ starodybseva@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9953-1888>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 14.12.2023 г.; принята к публикации 15.03.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tri Vinh Le,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Technology and Equipment for Machine-Building
Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
vinh_istu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0680-9009>

Vladimir P. Koltsov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of
Technology and Equipment for Machine-Building
Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
kolcov@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-6924-9504>

Daria A. Starodubtseva,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Technology and Equipment for Machine-Building
Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ starodybseva@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9953-1888>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 09.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 15.03.2024.