

УДК 621.7.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗОНИКОВЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОМ УПРОЧНЕНИИ

© 2024 Н.В. Носов, Д. А. Люшня, В.В. Власов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Упрочнение деталей взлетно-посадочных устройств из титановых сплавов сопряжено с большими сложностями, особенно это касается изменения точности формы и расположения поверхностей в процессе пневмодробеструйного упрочнения (ПДУ). Решение данной задачи технологического обеспечения точности и качества поверхности связано с управлением степенью и глубиной распространения остаточных напряжений после ПДУ. В статье решена задача моделирования процесса пневмо-дробеструйное упрочнение титанового сплава ВТ22 в программном комплексе ANSYS и RockyDEM. Рассматривались три постановки задачи: взаимодействие единичной дроби ; взаимодействие потока дроби с обрабатываемой поверхностью в 2D исполнении; взаимодействие потока дроби с обрабатываемой поверхностью в 3D исполнении. Рассмотрено динамическое поведение потока дроби, которое позволило определить размеры пятна контакта , наличие застойных зон, предельное количество ударов дроби в единичную вмятину для достижения предельной пластической деформации. Установлено, что увеличение скорости дроби с 60 м/с до 90 м/с позволяет уменьшить количество ударов с 12-15 раз до 6-8 .Расчеты показывают, что процесс ПДУ с режимами , полученными с помощью моделирования, повысили усталостную прочность детали на 28%.

**Ключевые слова:** моделирование ПДУ, остаточные напряжения, скорость дроби, пластическая деформация, режимы обработки, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, пятно контакта, застоечная зона, усталостная прочность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-265-271

EDN: IJWUCE

### ВВЕДЕНИЕ

Надёжность и долговечность крупногабаритных деталей из титановых сплавов взлетно-посадочных устройств в значительной степени зависят от качества изготавливаемых деталей, в том числе от качества их поверхностного слоя. В целом, титановые сплавы сочетают в себе высокие прочностные характеристики, легкость, коррозионную стойкость и температурную стойкость, что делает их идеальным выбором для применения в авиационной отрасли. В тоже время упрочнение деталей из титановых сплавов сопряжено с большими сложностями, особенно это касается процессов коробления [1, 2, 3, 8] . Как правило, на производстве стремятся минимизировать процесс коробления деталей за счет снижения режимов упрочнения, поэтому важно вопросы повышения производительности процесса упрочнения связать с созданием благоприятного напря-

Носов Николай Васильевич профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: nosov.nv@samgtu.ru  
Люшня Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: tom13-dmitry@yandex.ru  
Власов Владимир Владимирович старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

женно-деформированного состояния поверхностного слоя [4, 5, 13].

В качестве основного технологического процесса упрочнения крупногабаритных деталей из титановых сплавов на ОАО «Авиагрегат» г. Самара является процесс пневмодробеструйного упрочнения (ПДУ). Данный метод отделочно-упрочняющей обработки позволяет обрабатывать поверхности деталей сложной формы, стабилизировать шероховатость обработанных поверхностей, убрать окалину с поверхности, увеличить микротвёрдость поверхностного слоя, сформировать в поверхностном слое необходимые сжимающих остаточных напряжений (ОН) [10, 12, 16]. Требуемые показатели качества поверхностного слоя могут быть обеспечены за счёт выбора рациональных режимов процесса ПДУ: скорость дроби, диаметр дроби, материал дроби, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, скорость подачи сопла, угол наклона сопла к поверхности детали, исходную шероховатость поверхности и т.д. При этом ставится задача повышение производительности процесса за счет определение рациональных режимов обработки, которые гарантированно обеспечивали требуемые параметры качества. На практике ПДУ деталей из титановых сплавов осуществлялась на скоростях дроби не выше 60 м/с, в тоже время технологические возможности оборудования позволяют повысить скорость дроби 90 м/с.

## МЕТОДЫ

Реализацию данного высокоскоростного процесса целесообразно осуществлять на основе разработки математических моделей ПДУ, которые включали бы особенности взаимодействия распыляющего сопла (воздуха и дроби) с упрочняющей поверхностью деталей взлетно-посадочных устройств. Решением контактных задач теории упругости деформируемых твёрдых тел занимались Галин Д.А., Мусхелишвили Н.И., Прагер В., Петросов В. В., Лаврентьев М.А., Шабат Б.В., которые разработали методики определения упругих деформаций при различных условиях взаимодействия.

Широкое использование в данных работах [7,9,17] программных продуктов, базирующихся на методе конечно-элементного анализа, таких как ANSYS, LS-Dyna, Deform и т.д., позволило создать модель процесса дробеструйной обработки в квазистатической постановке, при которой единичная дробь взаимодействует с поверхностью. Например, Кузнецов В. П. [ 6, 14,15] в программе LS-Dyna смоделировал ранее указанный процесс в динамической постановке и определил пластические деформации материала и сдвиговые напряжения. Однако обе эти модели были получены авторами в двухмерной постановке, т.е. никто из авторов при построении конечно-элементных моделей не учитывал деформацию поверхности в трехмерной постановке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В работе моделирование процесса ПДУ титанового сплава BT22 ( $\rho=4506 \text{ кг/см}^3$ ,  $E=112 \text{ ГПа}$ ,  $\mu=0,32$ ) выполняется в программном комплексе ANSYS и RockyDEM и рассматривались три постановки задачи:

- взаимодействие единичной дроби и определение необходимого их количества для насыщения условной точки обрабатываемой поверхности;

- взаимодействие потока дроби с обрабатываемой поверхностью в 2D исполнении;

- взаимодействие потока дроби с обрабатываемой поверхностью в 3D исполнении.

**Постановка 1.** Электронная модель единичного воздействия.

Задаваемые параметры: скорость дроби, диаметр дроби, угол подачи дроби.

Результат: деформации и вносимые напряжения, представленные в виде числовых значений и цветовых спектров, при взаимодействии обрабатывающих частиц с обрабатываемой поверхностью (рис.1).

На рис.2 показаны кривая насыщения поверхности, которая получена при обработке поверхности с различным временем обработки. Насыщение достигается на той точке кривой, при которой деформация образцов не изменяется [ 9,18 ].

Исследование показало, что степень насыщения поверхности пластической деформации зависит от скорости дроби. Установлено, что, с увеличением скорости с 60 м/с до 90 м/с количество ударов до предельного насыщения поверхности снизилось с 12-15 ударов до 8-10 ударов (см.рис.2 б)

**Постановка 2.** Электронная 2D-модель потокового воздействия.

Задаваемые параметры: скорость дроби, диаметр дроби, угол подачи дроби, расстояние до поверхности.

Результат: наглядное подтверждение уравнения Шлихтинга и эпоры динамических параметров воздушной струи, возможность оценки возникновения застойных зон. Моделирование показало, что увеличение скорости дроби до 90 м/с, значительно уменьшает величину застойной зоны, которая при угле наклона струи  $70^\circ$  практически равна нулю.

**Постановка 3.** 3D-модель потокового воздействия.

Задаваемые параметры: скорость дроби, диаметр дроби, угол подачи дроби, расстояние

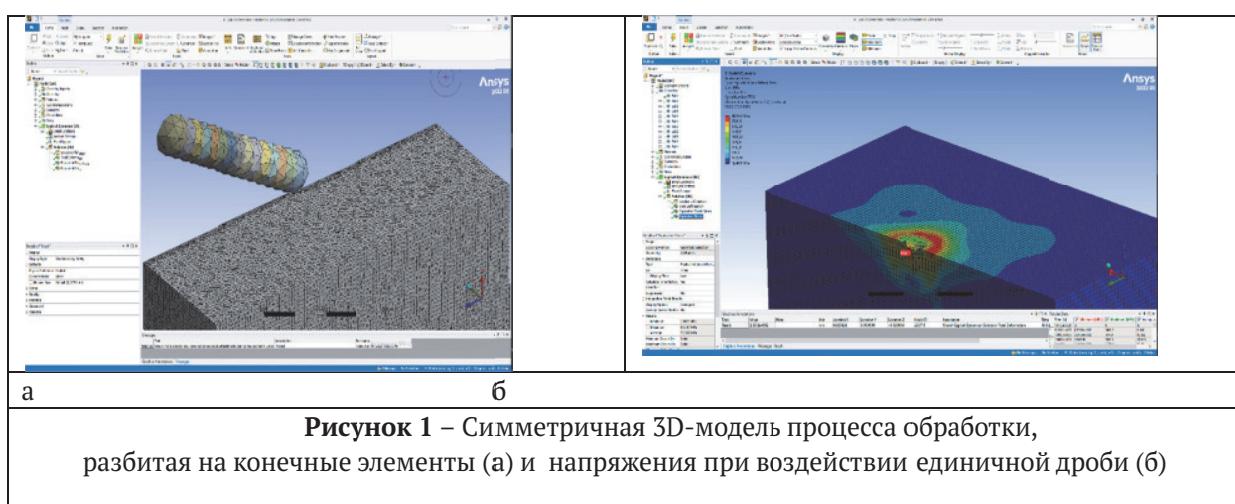


Рисунок 1 – Симметричная 3D-модель процесса обработки, разбитая на конечные элементы (а) и напряжения при воздействии единичной дроби (б)

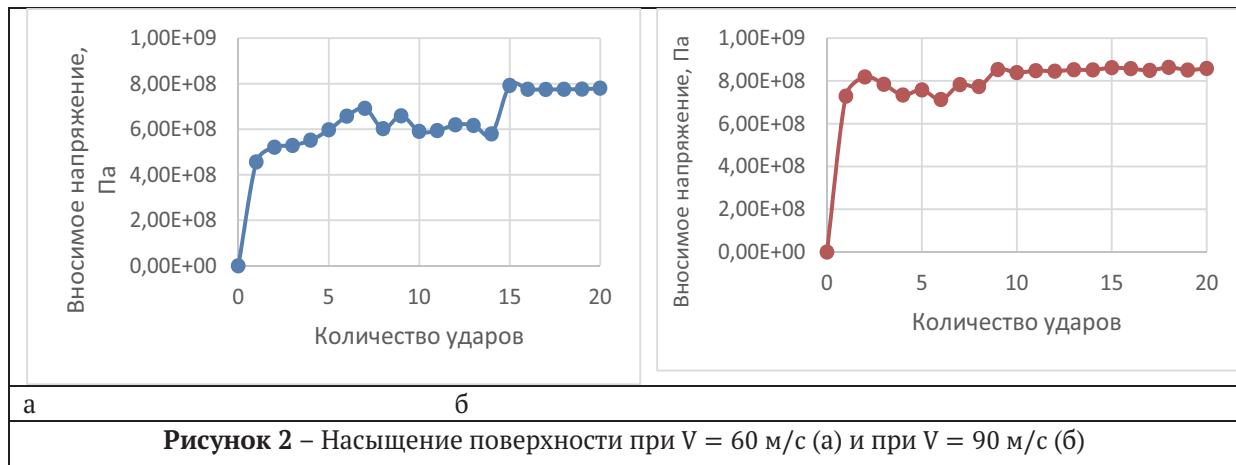
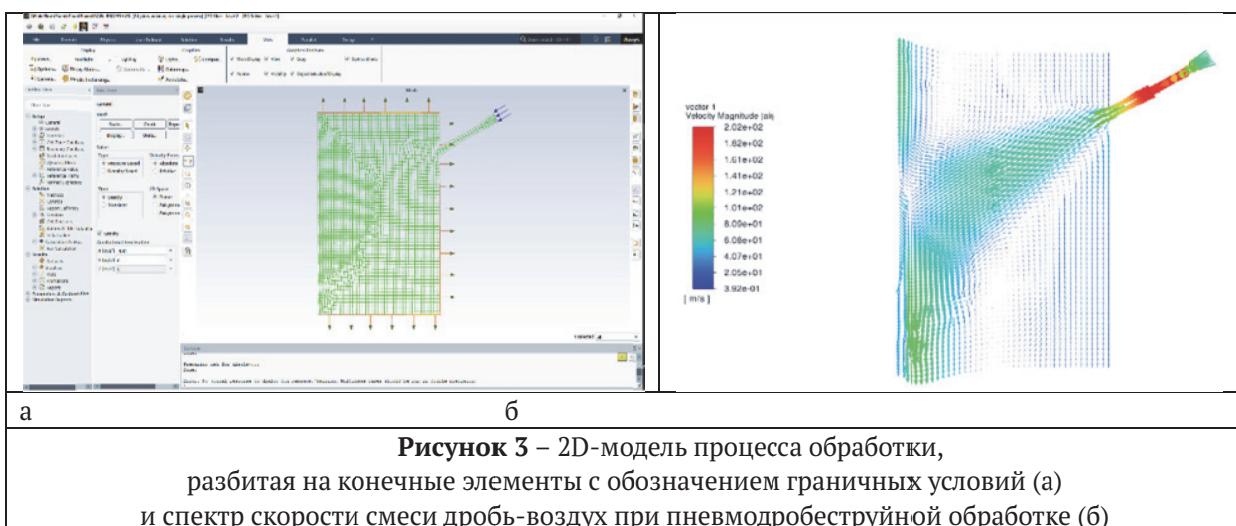
Рисунок 2 – Насыщение поверхности при  $V = 60$  м/с (а) и при  $V = 90$  м/с (б)

Рисунок 3 – 2D-модель процесса обработки, разбитая на конечные элементы с обозначением граничных условий (а) и спектр скорости смеси дробь-воздух при пневмодробеструйной обработке (б)

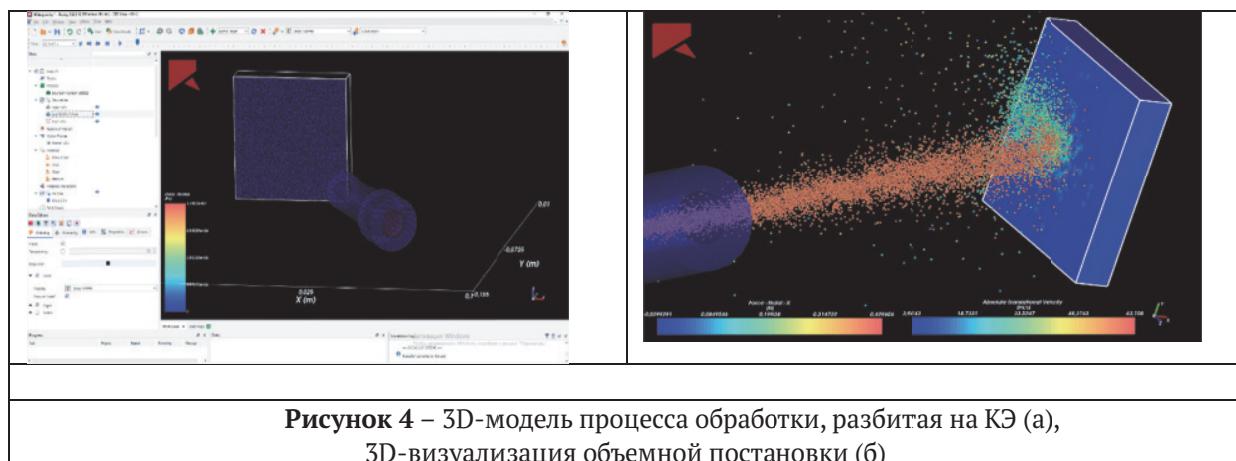


Рисунок 4 – 3D-модель процесса обработки, разбитая на КЭ (а), 3D-визуализация объемной постановки (б)

до поверхности, подача заготовки или инструмента.

Результат: визуализация траектории сопла, пятна контакта и оценки перекрытия. Возможен дальнейший экспорт модели в Ansys для подробного анализа состояния поверхности.

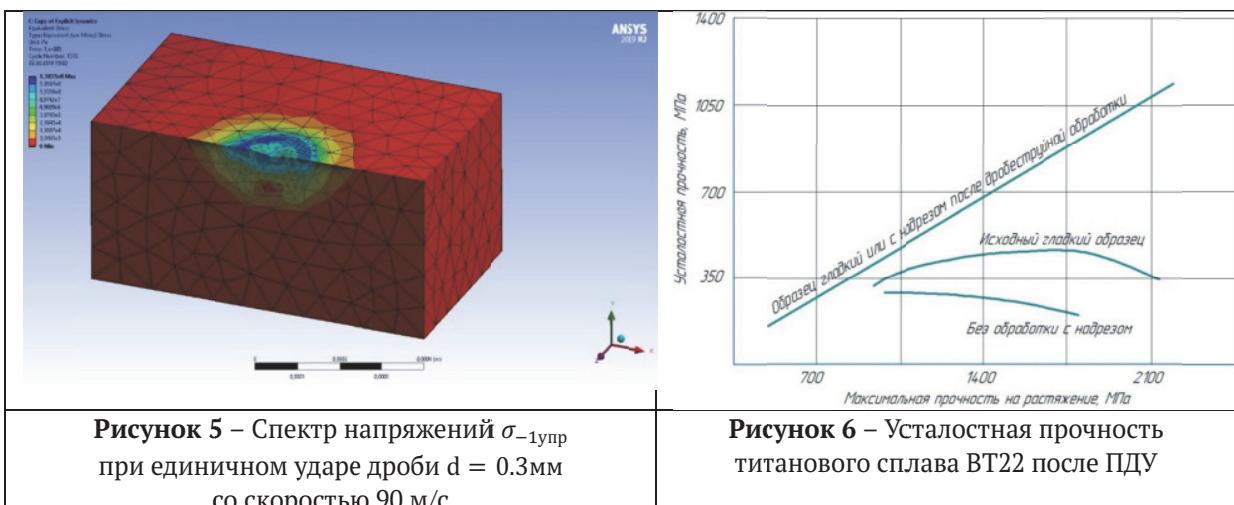
Теоретические исследования показали, что с увеличением скорости дроби остаточные напряжения и глубина их залегания повышаются при всех значениях угла наклона струи.

Применение метода ПДУ является эффективным методом повышения работоспособности, долговечности и надежности деталей взлетно-посадочных устройств.

В работе предложена модель усталостного износа поверхности из титанового сплава ВТ22 после ПДУ, с режимами:  $V = 90$  м/с, угол подачи дроби  $\alpha = 90^\circ$ , диаметр дроби  $d = 0.3$  мм. На рис. 5 приведен спектр напря-

**Таблица 1.** Теоретические расчеты параметров трехмерной симуляционной модели в соответствие с моделью см. рис. 5

Номер опыта	Факторы			Общая деформация, мм	Эквив. упругие деформации, мм	Эквив. Напряжения (по Мизесу), МПа	Глубина деформационного воздействия, мм	Глубина залегания максимальных напряжений, мм
	V, м/с	$\alpha$ , град	d, мм					
1	60	60	0,3	0,0316	0,0094	831,61	-0,063473	-0,00782
2	70			0,0356	0,0095	836,06	-0,064333	-0,012151
3	80			0,0434	0,0126	1212,70	-0,064380	-0,028246
4	90			0,0475	0,0124	1186,30	-0,085195	-0,041811
5	60	70	0,3	0,0196	0,0091	858,09	-0,085139	-0,008314
6	70			0,0227	0,0109	977,37	-0,105709	-0,046503
7	80			0,0340	0,0114	1060,60	-0,127265	-0,054809
8	90			0,0321	0,0102	949,39	-0,125863	-0,070551
9	60	90	0,3	0,0213	0,0100	887,67	-0,106512	-0,053662
10	70			0,0229	0,0144	1374,30	-0,147915	-0,064124
11	80			0,0279	0,0108	1017,10	-0,189330	-0,071254
12	90			0,0289	0,0108	931,56	-0,147945	-0,060211



**Рисунок 5 –** Спектр напряжений  $\sigma_{-1\text{упр}}$  при единичном ударе дроби  $d = 0,3\text{мм}$  со скоростью 90 м/с

**Рисунок 6 –** Усталостная прочность титанового сплава ВТ22 после ПДУ

нений  $\sigma_{-1\text{упр}}$ , полученный в программном комплексе Ansys Static Structural.

Основным параметром характеризующим процесс упрочнения поверхностей является коэффициент упрочнения [11, 20]:

$$\beta_{\text{упр}} = \sigma_{-1\text{упр}} / \sigma_{-1}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-1\text{упр}}$  – пределы выносливости детали соответственно до и после ПДО.

Усталостная прочность зависит от максимальной прочности на растяжение материала.

Расчеты показывают, что усталостная прочность после ПДУ составляет примерно 640 МПа.

По данным [5, 19] титановый сплав ВТ22 имеет предел выносливости в неупрочненном состоянии  $\sigma_{-1}=500\ldots 505$  МПа, а максимальная прочность на растяжение составляет  $\sigma_b=1350$  МПа. Поверхности из ВТ22 составляет примерно 640 МПа, что совпадает с исследованиями компании Metal Improvement Company (рис. 6) [4].

Из графика видно, что при прочности на растяжение  $\sigma_b=1350$  МПа величина  $\sigma_{-1\text{упр}}$  состав-

ляет 640 МПа, подставив найденное значение в уравнение (1), получим:  $\beta_{\text{упр}} = 640/500 = 1,28$  следовательно, процесс обработки позволяет повысить усталостную прочность детали на 28%.

Выводы: создание конечно-элементной и имитационной моделей позволило оценить напряженно-деформированное состояние поверхности слоя заготовок, а также глубину распространения пластической деформации в поверхностном слое обрабатываемого материала после ПДУ. Установлено, что увеличение скорости дроби при ПДУ до 90 м/с, производительность повысилась в 1,2-1,4 раза, за счет увеличения скорости подачи сопла, при выполнении технических требований по качеству поверхности. Кроме того – визуализация динамического поведения потока дроби, дает возможность определить размеры пятна контакта и наличие застойных зон, вызванных столкновением прибывающих и отскочивших от поверхности дроби. Моделирование показало, что при соблюдении принятых режимов обработки усталостная прочность деталей из титанового сплава повысилась на 28 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. – 624 с.
2. Безъязычный, В.Ф. Методика исследования напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД после дробеструйного упрочнения / В.Ф. Безъязычный, А.Н. Рябов, А.Н. Сутягин, А.В. Толкачев // Инженерный журнал. – 2015. – № 1. – С. 104–108.
3. Богуслаев, В.А. Финишные технологии обработки деталей ГТД [Текст] / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 71–78.
4. Бубнов, В.А. Титан и его сплавы в машиностроении / В.А. Бубнов, А.Н. Князев // Вестник Курганского государственного университета. – 2016. – № 3(42).
5. Джураев, А.Д. Анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при дробеструйном упрочнении деталей машин. [Текст] / А.Д. Джураев, И.Г. Шин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 10. – С. 3–7.
6. Кузнецов, Н.Д. Пневмодробеструйное упрочнение [Текст] / Н.Д. Кузнецов // Справочник. Инженерный журнал. – 2002. – № 6. – С. 14–19.
7. Матлин, М.М. Комбинированное пластическое деформирование деталей дробью [Текст]. / М.М. Матлин, С.Л. Лебский // Вестник машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 54–56.
8. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента [Текст] / В.В. Петросов. – М. : Машиностроение, 1977. – 167 с.
9. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с
10. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
11. Шанявский, А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях: Монография. – Уфа, 2003. – 803 с.
12. Рыбаков, Г.М. Формирование сжимающих остаточных напряжений в металлических деталях при дробеструйной обработке [Текст] / Г.М. Рыбаков // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 51–54.
13. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300
14. Соловов, А.В. Конструкция самолетов: фундаментальные основы и классика типовых решений: учебное пособие для вузов / А.В. Соловов, А.А. Меньшикова. – М. : Юрайт, 2022. – 385 с.
15. Тамаркин, М.А. Технологические основы обработки деталей ППД в гибких гранулированных средах [Текст] / М.А. Тамаркин [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. 4.2: Материалы 9-й Международной практической конференции: СПб.: Издательство Политехнического университета. – 2007. – С. 224–233.
16. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.
17. Кургузов, Ю.И. Движение микрочастиц в воздушной среде при пневмодробеструйной обработке / Ю.И. Кургузов, Д.А. Люшня // Известия Самарского научного центра РАН. – 2020. – № 3. С. 120–126.
18. Asi O, Yesil O. Failure analysis of an aircraft nose landing gear piston rod end. Eng Fail Anal 2013;32:283–91.
19. Bagnoli F, Bernabei M. Fatigue analysis of a P180 aircraft main landing gear wheel flange. Eng Fail Anal 2008;15:654–65.
20. Barter SA. Investigation of a Boeing 747 wing main landing gear trunnion failure. Eng Fail Anal 2013;35:387–96.

## MODELING OF THE PROCESS OF RESIDUAL STRESS GENERATION DURING PNEUMATIC BLAST HARDENING

© 2024 N.V. Nosov, D. A. Lyushnya, V.V. Vlasov

Samara State Technical University, Samara, Russia

The hardening of the details of take-off and landing devices made of titanium alloys is fraught with great difficulties, especially with regard to changing the accuracy of the shape and location of surfaces in the process of pneumatic blast hardening. The solution to this problem of technological assurance of accuracy and surface quality is associated with controlling the degree and depth of propagation of residual stresses after the remote control. The article solves the problem of modeling the process of pneumatic shotblasting of titanium alloy VT22 in the ANSYS and RockyDEM software package. Three problem statements were considered: the interaction of a single fraction; the interaction of the fraction flow with the processed surface in 2D execution; the interaction of the fraction flow with the processed surface in 3D execution. The dynamic behavior of the fraction flow is considered, which made it possible to determine the size of the contact spot, the presence of stagnant zones, and the maximum number of impacts of the fraction into a single dent to achieve maximum plastic deformation. It has been found that increasing the fraction velocity from 60 m/s to 90 m/s reduces the number of strokes from 12-15 times to 6-8. Calculations show that the remote control process with the modes obtained by modeling increased the fatigue strength of the part by 28%.

**Keywords:** remote control modeling, residual stresses, fraction velocity, plastic deformation, processing modes, finite element model, stress-strain state, contact spot, stagnant zone, fatigue strength.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-265-271

EDN: IJWUCE

### REFERENCES

1. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tekhnologii [Tekst] / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov-na-Donu: DGTU, 1999. – 624 s.
2. Bez'yazychnyj V.F. Metodika issledovaniya napryazhenij v poverhnostnom sloe lopatok GTD posle drobestruijnogo uprochneniya / V.F. Bez'yazychnyj, A.N. Ryabov, A.N. Sutyagin, A.V. Tolkachev // Inzhenernyj zhurnal. – 2015. – № 1. – S. 104–108.
3. Boguslaev, V.A. Finishnye tekhnologii obrabotki detailej GTD [Tekst] / V.A. Boguslaev, A.YA. Kachan, V.F. Mozgovoj // Vestnik dvigatelestroeniya. – 2009. – № 1. – S. 71 -78.
4. Bubnov, V.A. Titan i ego splavy v mashinostroenii / V.A. Bubnov A.N. Knyazev // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2016. – № 3(42).
5. Dzhuraev, A.D. Analiz napryazhennodeformirovannogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya pri drobestruijom uprochnenii detailej mashin. [Tekst] / A.D. Dzhuraev, I.G. SHin // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2009. – № 10. – S. 3-7
6. Kuznecov, N.D. Pnevmodrobestruijnoe uprochnenie [Tekst] / N.D. Kuznecov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2002. – № 6. – S. 14 - 19.
7. Matlin, M.M. Kombinirovannoe plasticheskoe deformirovanie detailej drob'yu [Tekst]. / M.M. Matlin, S.L. Lebskij // Vestnik mashinostroeniya. – 2000. – № 1. – S. 54-56.
8. Petrosov, V.V. Gidrodrobestruijnoe uprochnenie detailej i instrumenta [Tekst] / V.V. Petrosov. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 167 s.
9. Smelyanskij, V.M. Mekhanika uprochneniya detailej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / V.M. Smelyanskij. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 300 s
10. Sulima, A.M. Poverhnostnyj sloj i ekspluatacionnye svojstva detailej mashin [Tekst] / A.M. Sulima, V.A. SHulov, YU.D. YAgodkin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 240 s.
11. Shanyavskij, A.A. Bezopasnoe ustalostnoe razrushenie elementov aviakonstrukcij. Sinergetika v inzhenernyh prilozheniyah: Monografiya. – Ufa, 2003. – 803 s.
12. Rybakov, G.M. Formirovanie szhimayushchih ostatochnyh napryazhenij v metallicheskikh detalyah pri drobestruijnoj obrabotke [Tekst] / G.M. Rybakov // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2007. – № 1. – S. 51 - 54.
13. Smelyanskij, V.M. Mekhanika uprochneniya detailej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / V.M. Smelyanskij. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 300
14. Solovov, A.V. Konstrukciya samoletov: fundamental'nye osnovy i klassika tipovyh reshenij: uchebnoe posobie dlya vuzov / A.V. Solovov, A.A. Men'shikova. – M. : YUrajt, 2022. – 385 s.
15. Tamarkin, M.A. Tekhnologicheskie osnovy obrabotki detailej PPD v gibkikh granulirovannyh sredah [Tekst] / M.A. Tamarkin [i dr.] // Tekhnologii remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detailej mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki. 4.2: Materialy 9-j

- Mezhdunarodnoj prakticheskoy konferencii: SPb.: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta. – 2007. – S. 224–233.
16. Sulima, A.M. Osnovy tekhnologii proizvodstva gazoturbinnyh dvigatelej: uchebnik dlya studentov aviac. spec. vuzov / A.M. Sulima, A.A. Noskov, G.Z. Serebrennikov. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 480 s.
17. Kurguzov, Yu.I. Dvizhenie mikrochastic v vozdushnoj srede pri pnevmodrobestrujnoj obrabotke / YU.I. Kurguzov, D.A. Lyushnya // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2020. – № 3. S. 120–126.
18. Asi O, Yesil O. Failure analysis of an aircraft nose landing gear piston rod end. Eng Fail Anal 2013;32:283–91.
19. Bagnoli F, Bernabei M. Fatigue analysis of a P180 aircraft main landing gear wheel flange. Eng Fail Anal 2008;15:654–65.
20. Barter S.A. Investigation of a Boeing 747 wing main landing gear trunnion failure. Eng Fail Anal 2013;35:387–96.

---

Nikolay Nosov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools

E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Dmitry Lyushnya, Postgraduate Student of the Department Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: tom13-dmitry@yandex.ru

Vladimir Vlasov, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools.