

УДК 621.787 + 539.3

РАСЧЁТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТОНКОСТЕННЫХ ВАЛОВ, УПРОЧНЯЕМЫХ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2015 А. С. Букатый, А. Н. Швецов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрены расчётные методы исследования остаточного напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя валов, упрочняемых дробеструйной обработкой и алмазным выглаживанием. Валы, изготавливаемые на авиационных производствах, в основном тонкостенные. Кроме того, к ним предъявляются высокие требования по точности геометрических размеров и формы. Обеспечение сопротивления усталости валов достигается применением упрочняющей обработки. Остаточные напряжения от упрочняющей обработки приводят к остаточным деформациям валов, часто превышающим технологические допуски. Предлагаемые в данной работе модели и подходы позволяют расчётным путём прогнозировать остаточное напряжённо-деформированное состояние поверхностного слоя после алмазного выглаживания, осуществлять расчётное прогнозирование технологических остаточных деформаций валов от полученных остаточных напряжений и корректировать режимы дробеструйного упрочнения и алмазного выглаживания на стадии разработки технологического процесса. Работы проводились на примере валов из материалов ВТ-22 и ЭП517-Ш (15X12H2МВФАБ-Ш). По результатам работ показано, что применение предварительного расчётного анализа режимов обработки позволяет обеспечить остаточные деформации наиболее ответственных участков валов – посадочных поверхностей под подшипники – в пределах технологических допусков, а также снизить растягивающие остаточные напряжения на поверхности вала после алмазного выглаживания.

Дробеструйная обработка, алмазное выглаживание, остаточные напряжения, технологические остаточные деформации, сопротивление усталости.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-474-480

Введение

Повышение сопротивления усталости тонкостенных валов, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок, является важной задачей, стоящей перед авиационными производствами. Решение указанной задачи достигается применением упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования. Наиболее распространёнными методами упрочнения валов являются пневмодробеструйная обработка, алмазное выглаживание, обкатка роликом. Наличие на валах посадочных поверхностей с жёсткими технологическими допусками значительно усложняет процесс назначения режимов упрочняющей обработки. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое повышают долговечность валов, однако приводят к технологическим остаточным деформациям, в результате чего необходимо назначать

режимы обработки с учётом заданных технологических допусков на геометрические размеры и форму особо ответственных поверхностей. Кроме того, следует исключить перенаклёп упрочняемой поверхности, так как это ведёт к появлению растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали и понижению сопротивления усталости. В связи с этим целью данной работы является разработка методик, позволяющих на стадии проектирования технологического процесса изготовления валов осуществить расчётное прогнозирование остаточных напряжений и деформаций валов, назначить параметры упрочняющей обработки, обеспечивающие оптимальное распределение сжимающих остаточных напряжений и остаточные деформации в пределах технологических допусков.

Упрочнение посадочных поверхностей тонкостенных валов дробеструйной обработкой. Дробеструйное упрочнение приводит к появлению остаточных напряжений в поверхностном слое деталей и, как следствие, технологическим остаточным деформациям (ТОД), наиболее значимой из которых является увеличение диаметра посадочных поверхностей. В зависимости от интенсивности режима упрочнения и диаметра дроби увеличение может составлять до 0.1 мм. При этом наибольшее влияние на остаточные деформации оказывает диаметр дроби и давление воздуха.

Исследуемой деталью являлся тонкостенный вал диаметром 140×110 мм из сплава ВТ-22. Упрочнению на роботизированной пневмодробеструйной установке стальными микрошариками подвергались посадочные поверхности под подшипники. Режимы упрочняющей обработки вала назначались на основе энергетического метода [1]. Ранее исследовались различные режимы работы упрочняющей установки. Из материала ВТ-22 были изготовлены прямоугольные образцы, подвергаемые дробеструйной обработке. Остаточные напряжения в образцах определялись методом электролитического травления на установке АСБ-1 [2]. В результате были получены эпюры остаточных напряжений, соответствующие различным режимам упрочнения. Для проведения опытных работ по назначению режима дробеструйной обработки вала был изготовлен образец цилиндрической формы из материала ВТ-22, имитирующий упрочняемый участок детали. Наружный и внутренний диаметры образца составляют 140×110 мм. В системе ANSYS создана модель образца (рис. 1). В модели выделен поверхностный слой, толщина которого составляет 0.17 мм и соответствует глубине залегания сжимающих остаточных напряжений. Основной объём детали размечен элементами Solid 45, поверхностный слой размечен элементами Solid-Shell 193. По методике [3] в поверхностный слой модели образца загрузились

эпюры остаточных напряжений, соответствующие различным режимам упрочнения.

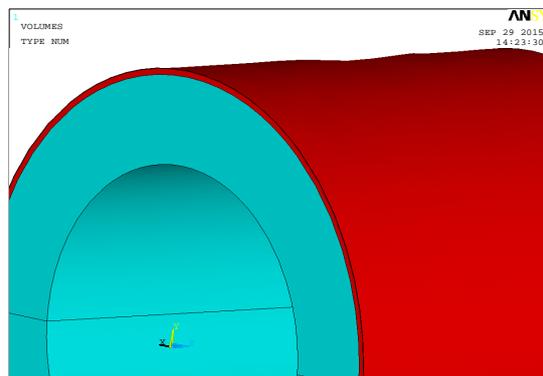


Рис. 1. Модель цилиндрического образца

В результате расчётов были получены деформации образца (рис. 2), на основе которых был выбран режим упрочнения, соответствующий полученным деформациям: давление воздуха $P = 0,3$ МПа, расход микродроби $G = 4.5$ кг, диаметр шариков $D_{ш} = 0.6$ мм. Эпюра остаточных напряжений, соответствующая выбранному режиму, показана на рис. 3.

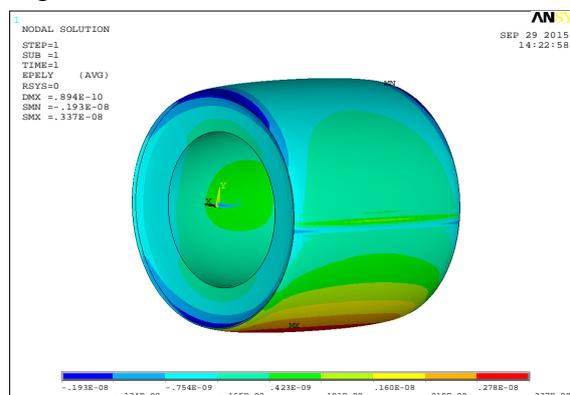


Рис. 2. Расчётные деформации образца



Рис. 3. Эпюра распределения остаточных напряжений

По результатам расчётов максимальное изменение диаметра образца составило 0.0142 мм, при этом образец принял бочкообразную форму. После упрочнения цилиндрического образца на выбранном режиме произошло изменение диаметра: 0.01–0.12 мм. Упрочнение натурной детали на выбранном режиме привело к увеличению диаметра посадочной поверхности: 0.008 мм – в краевой зоне у торца вала, 0.01 мм – посередине упрочнённого участка и 0.012 мм – на крае упрочнённого участка ближе к середине вала. При этом необходимо учитывать, что если поверхность приближена к торцу вала, то профиль упрочнённой поверхности приобретает конусовидную форму вследствие действия краевого эффекта [4]. Конусность составляет до 0.004 мм на длине 150 мм.

При проведении работ по увеличению диаметра вала в ремонтном производстве необходимо применять стальные шарики диаметром более 2 мм. Микродроль 0.6 мм не даёт необходимой степени деформации поверхностного слоя для значительного увеличения диаметра.

По результатам проведённых работ установлено: применение разработанных методик прогнозирования ТОД позволяет провести предварительный анализ и прогнозирование изменения геометрических размеров и формы деталей, что особенно

актуально при упрочнении ответственных деталей, подверженных короблению.

Алмазное выглаживание тонкостенных валов. Алмазное выглаживание относится к методам отделочно-упрочняющей обработки, повышающих качество поверхности деталей. Оно приводит к снижению шероховатости поверхности и формированию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

В качестве образцов для выглаживания использовались кольца из сплава ЭП517-Ш (15Х12Н2МВФАБ-Ш) с наружным диаметром 108 мм, внутренним – 98 мм, шириной 10,5 мм, вырезанные из вала. Режимы обработки выглаживанием устанавливались, исходя из проведённого полнофакторного эксперимента. Сила выглаживания соответствовала 50 и 200 Н, радиус сферы алмазного инструмента 1,5 и 2,5 мм, величина продольной подачи 0,02 и 0,08 мм, скорость выглаживания 21,5 и 68 м/мин. В качестве смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовалось масло И20. Остаточные напряжения исследовались на установке АСБ-1 в сегментах, вырезанных из кольцевых образцов. С целью оптимизации процесса выглаживания была построена конечно-элементная модель (рис. 4).

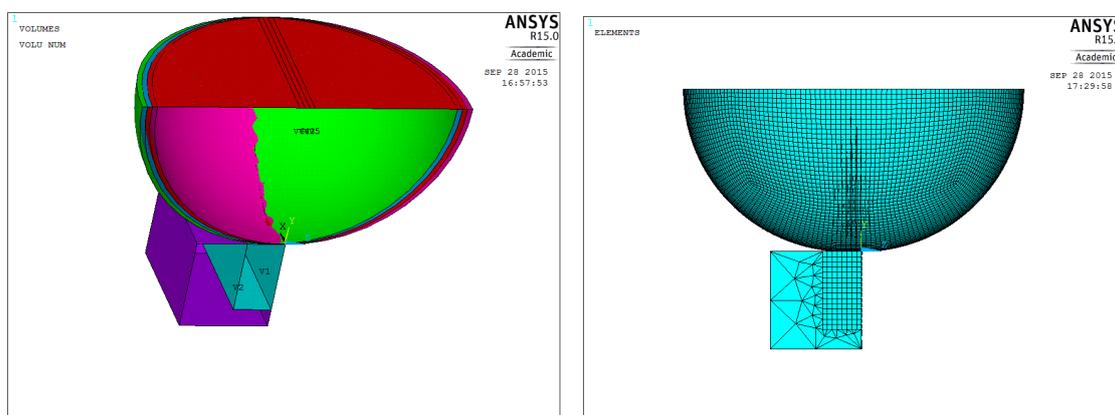


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса алмазного выглаживания

Моделирование процесса осуществлялось по аналогии с работами [5,6], где зона под сферой инструмента выделялась

объёмом с густо разбитой конечно-элементной сеткой, элементами SHELL63 и SOLID45. Размеры образца были

выбраны следующими: длина – 4 мм, толщина – 1,5 мм, ширина – 1,4 мм. Параметры процесса выглаживания выбирались исходя из получения наилучшей шероховатости поверхности.

Радиус сферы инструмента $R_{cf} = 2,5$ мм, величина подачи $S_o = 0,02$ мм/об, сила выглаживания $P_y = 200$ Н, скорость выглаживания в расчёте не учитывалась и задавалась величиной перемещения инструмента. Величина подачи задавалась путём создания дополнительных сфер, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном величине подачи. Результаты численного расчёта (рис. 5) показывают,

что на поверхности образца формируются напряжения растяжения, что понижает сопротивление усталости и уменьшает работоспособность деталей. Аналогичный характер распределения величины остаточных напряжений получен и при экспериментальных исследованиях (рис. 6, кривая 4). Из графиков видно, что при небольшом усилии на поверхности обработанной поверхности формируются сжимающие напряжения, а при небольшой величине продольной подачи на поверхности формируются значительные растягивающие напряжения.

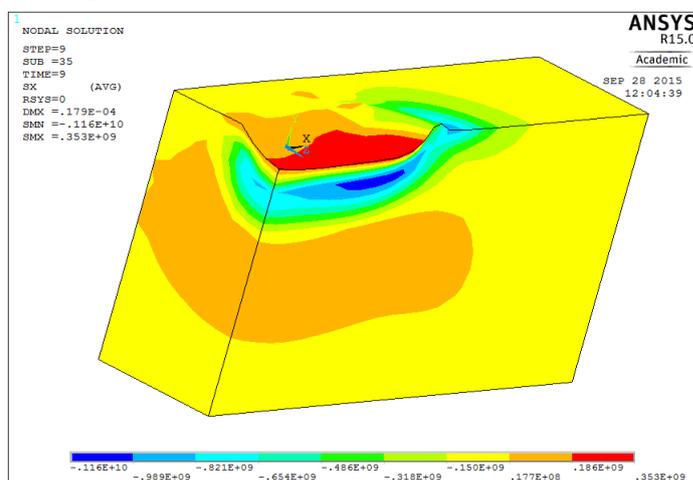


Рис. 5. Результаты конечно-элементного моделирования процесса выглаживания

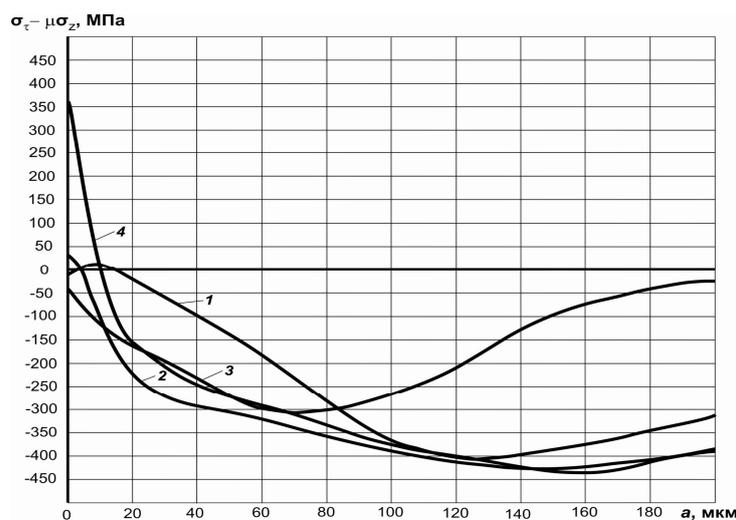


Рис. 6. Эпюры распределения остаточных напряжений в поверхности образца при выглаживании:
 1 – $P_y = 250$ Н, $S_o = 0,08$ мм/об, $R_{cf} = 2,5$ мм; $v = 68$ м/мин; 2 – $P_y = 250$ Н, $S_o = 0,08$ мм/об, $R_{cf} = 1,5$ мм; $v = 68$ м/мин; 3 – $P_y = 50$ Н, $S_o = 0,08$ мм/об, $R_{cf} = 2,5$ мм; $v = 68$ м/мин; 4 – $P_y = 200$ Н, $S_o = 0,02$ мм/об, $R_{cf} = 2,5$ мм; $v = 68$ м/мин

Данная конечно-элементная модель может быть использована для оптимизации режимов алмазного выглаживания с целью минимизации возможных значений растягивающих напряжений на поверхности валов, а также для анализа ТОД.

Выводы

1. Расчётное прогнозирование ТОД позволяет анализировать способы и режимы упрочняющей обработки валов на стадии проектирования технологического процесса.

2. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием может применяться в ремонтном производстве с це-

лью увеличения диаметра посадочных поверхностей.

3. Оптимизация режимов алмазного выглаживания с применением изложенных расчётных методик позволяет минимизировать растягивающие остаточные напряжения на поверхности детали.

4. Эпюра остаточных напряжений, полученная расчётным путём при моделировании алмазного выглаживания, может быть использована для расчётного прогнозирования остаточных деформаций валов и позволяет учесть эффект упрочнения при проведении типовых расчётов на прочность.

Библиографический список

1. Букатый А.С., Стогов В.С., Иванов А.А. Оптимизация режимов дробеструйного упрочнения высокоточных деталей на основе энергии поверхностного пластически деформированного слоя // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций». Т. 1. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 56-57.

2. Букатый, С.А., Букатый А.С. Автоматизированная система определения остаточных напряжений // Труды XXXVIII Уральского семинара «Механика и процессы управления». Т. 1. Екатеринбург-Миасс: УрО РАН, 2008. С. 191-194.

3. Букатый С.А., Букатый А.С. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10(67). С. 45-49.

4. Букатый С.А., Иванов С.И. Изменение размеров тонкостенного вала после

упрочняющей обработки поверхности // Сборник научных трудов «Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций». Вып. 3. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1977. С. 83-87.

5. Швецов, А.Н., Скуратов Д.Л. Анализ результатов моделирования алмазного выглаживания отверстий средствами CAE-технологий в программном комплексе ANSYS // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении». Самара: Самарский государственный технический университет, 2011. С. 34-36.

6. Швецов, А.Н. Скуратов Д.Л. Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали при алмазном выглаживании в программном комплексе ANSYS // Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы моделирования современного машиностроения и металлургии». Ч. 2. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2012. С. 49-53.

Информация об авторах

Букатый Алексей Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bukaty@inbox.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения, остаточные деформации, сопротивление усталости, оптимизация на-

пряжённо-деформированного состояния деталей.

Швецов Алексей Николаевич, ассистент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shvecovalexey@yandex.ru. Область научных интересов: процессы поверхностно-пластического деформирования материалов.

CALCULATION METHODS OF INVESTIGATING THE SURFACE LAYER OF THIN-WALLED SHAFTS HARDENED BY METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

© 2015 A. S. Bukaty, A. N. Shvetsov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Calculation methods of investigating the residual stress-strain state of the surface layer of shafts hardened by shot peening and diamond burnishing are discussed in the paper. Shafts manufactured at aircraft plants are mostly thin-walled. In addition high requirements are imposed on the accuracy of their geometric dimensions and shape. Ensuring the fatigue resistance of shafts is achieved by applying hardening treatment. Hardening treatment residual stresses result in residual deformation of shafts often exceeding manufacturing tolerances. The models and approaches proposed in this paper make it possible to predict computationally the residual stress-strain state of the surface layer after diamond burnishing as well as technological residual deformations of the shafts caused by residual stress. They also allow adjusting the modes of shot peening and diamond burnishing at the stage of process development. The work was carried out for a shaft made of VT-22 and EP517-SH materials. The results of the investigation show that the use of preliminary numerical analysis of treatment modes makes it possible to ensure residual deformations of the most critical sections of the shafts and seating surfaces for bearings within manufacturing tolerances and also to reduce tensile residual stress on the shaft surface after diamond burnishing.

Shot peening, diamond burnishing, residual stresses, technological residual strains, fatigue resistance.

References

1. Bukaty A.S., Stogov S.V., Ivanov A.A. Optimization of shot peening regimes of precision parts based on the energy of the surface plastically deformed layer. *International Conference «Strength of Materials and Structural Elements: Proceedings»*. V. 1. Kiev: Institute for Problems of Strength Publ., 2011. P. 56-57. (In Russ.)
2. Bukaty S.A., Bukaty A.S. Automated system for determining residual stresses. *Proceedings of the XXXVIII international «Mechanics and control processes»*. V. 1. Ekaterinburg-Miass: Russian Academy of Sciences Ural Branch Publ., 2008. P. 191-194. (In Russ.)
3. Bukaty S.A., Bukaty A.S. Energy method to determine the rational regimes of hardening of thin-walled and small-hard turbine engine parts by surface plastic deformation. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2009. No. 10(67). P. 45-49. (In Russ.)
4. Bukaty S.A., Ivanov S.I. Izmenenie razmerov tonkostennogo vala posle

uprochnyayushchey obrabotki poverkhnosti. *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy prochnosti i dolgovechnosti elementov aviatsionnykh konstruksiy»*. V. 3. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute Publ., 1977. P. 83-87. (In Russ.)

5. Shvetsov A.N. Skuratov D.L. Analiz rezultatov modelirovaniya almaznogo vyglazhivaniya otverstiy sredstvami CAE-tekhnologiy v programnom komplekse ANSYS. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhduna-*

rodnym uchastiem «Vysokie tekhnologii v mashinostroenii». Samara: Samara State Technical University Publ., 2011. P. 34-36. (In Russ.)

6. Shvetsov A.N. Stress-strain state modeling of surface layer of part at the diamond smoothing in ANSYS. *Fundamental and applied problems in the modeling of modern engineering and metallurgy. Collection of scientific works*. Part 2. Lipetsk: Lipetsk State Technical. University Publ., 2012. P. 49-53. (In Russ.)

About the authors

Bukaty Alexey Stanislavovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: bukaty@inbox.ru. Area of Research: residual stress, residual strain, fatigue, optimization of strain- stress state of parts.

Shvetsov Alexey Nikolaevich, assistant, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: shvecovalexey@yandex.ru. Area of Research: processes related to surface plastic strain of materials.