

УДК 05.02.00

DOI: 10.30987/article_5d10851f00a262.78462947

В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев

КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ДОВОДКЕ БЫСТРОХОДНЫХ РОТОРОВ

Рассмотрены технологические проблемы, возникающие при балансировке высокооборотных роторов турбонасосных агрегатов. Приведены их эксплуатационные условия работы в связи с разупрочнением рабочих поверхностей от нежелательной технологической наследственности в местах снятия металла. Показаны пути совершенствования процессов технологической доводки роторов

с использованием методов локальной отделочно-упрочняющей комбинированной обработки.

Ключевые слова: устранение дисбаланса, динамическая балансировка, быстроходные роторы, доводка, зоны разупрочнения, лопаточные детали, ресурс, комбинированное упрочнение микрошариками.

V.N. Sokolnikov, G.A. Sukhochev

BLADE PARTS COMBINED PROCESSING AT HIGH-SPEED ROTOR DEVELOPMENT

Technological problems arising at high-speed rotor balancing in turbine pump units are considered. There are shown their operation conditions of work in view of working surface softening against an extraneous technological heredity in the areas of metal removal. The ways for the improvement of rotor technologi-

cal development processes with the use of the methods of local finish-strengthening combined processing.

Key words: imbalance elimination, dynamic balancing, high-speed rotors, development, softening areas, blade parts, resource, combined strengthening with micro-balls.

Неуравновешенность быстроходных роторов, обусловленная их дисбалансом, вызывает появление вибраций, которые снижают многие эксплуатационные показатели машин и механизмов. Поэтому возникает необходимость балансировки роторов [1; 2]. Особенно это актуально для современных энергетических машин с лопаточными деталями, к которым предъявляются высокие требования по надёжности, точности, ресурсу и долговечности.

сти ротора и осью вращения 0,1 мм давление на подшипники будет соответствовать весу ротора. При увеличении частоты вращения до 100 с^{-1} давление на подшипники будет в четыре раза превосходить статическое, а при частоте до 500 с^{-1} - в 100 раз больше веса ротора [3].

Основными критериями, предъявляемыми к современной технике, являются коэффициент полезного действия, который напрямую зависит от параметров лопаточной машины, и ресурс работы, зависящий от физико-механического состояния поверхностного слоя материала нагруженной детали. Для достижения этих параметров и увеличения возможностей машины очень часто увеличивают частоту вращения ротора до предела. Однако при повышении частоты вращения роторов возникают сложности в процессе обеспечения сборки и в процессе получения стабильных параметров ротора. Так, при частоте 50 с^{-1} и разности расстояний между центром тяже-

В связи с этим подшипники даже при небольшом смещении центра тяжести ротора воспринимают сильнейшие нагрузки. Высокие статические и динамические нагрузки влияют прежде всего на работоспособность лопаток рабочих колес турбины, как наиболее напряженных элементов. Относительно большие радиальные габариты и сложная силовая схема корпусных деталей способствуют тому, что ряд элементов конструкции работают в области упруго-пластических деформаций. Достижение требуемой долговечности конструкции лопаточной детали делает актуальной задачу обеспечения малоциклового и многоциклового усталости при высоком уровне напряженности элементов конструкции.

Следовательно, обеспечение заданного ресурса работы в значительной степени зависит от напряженности турбины,

так как лопатки турбины всегда являются высоконапряженными элементами конструкции, определяющими работоспособность всего изделия. Сложность условий работы турбины заключается в воздействии на нее ряда трудноучитываемых факторов: кратковременного повышения температуры при запуске и выключении двигателя, неравномерности температурного поля на входе, пульсаций давления в проточной части, способа выхода на режим и порядка выключения, циклограммы работы двигателя, деформации диска (из-за того, что окружная рабочая скорость рабочего колеса турбины может достигать 600 м/с).

Статическая прочность рабочего колеса турбины обеспечивается на всех режимах эксплуатации двигателя и подтверждается испытаниями на разгонном стенде до разрушающей частоты вращения. Однако в процессе эксплуатации при циклической работе на режимах, превышающих 100 % номинального, в зонах корневого сечения лопаток и их сопряжения с бандажом возникают трещины. В указанных зонах местные напряжения с учетом концен-

трации превышают предел текучести материала. Это приводит к образованию трещин в лопатках через пять-шесть циклов нагружения. Лопатки нагружены не только циклической температурно-силовой нагрузкой, связанной с запуском и остановом, но и пульсациями давления.

В связи с этим проблемы балансировки энергетических машин, высокоточного уравнивания механизмов с достижением минимального уровня остаточного дисбаланса имеют крайне важное значение. В общем виде известные методы балансировки [3] объединяет то, что для приведения центра массы на ось для снижения сил, действующих на опоры, проводится балансировка роторов посредством или снятия части металла конструкции со стороны «тяжелого» участка, или установки дополнительных грузов со стороны «легкого» места.

Методы балансировки быстроходных роторов, к сожалению, предусматривают снятие излишков металла в местах повышенной концентрации эксплуатационных экстремальных нагружений (рис. 1).



Рис. 1. Участки неравномерного снятия материала для устранения дисбаланса на турбине

Так как все лопаточные детали роторной группы подвергают в процессе изготовления отделочно-упрочняющей обработке [1; 4], повышающей ресурс рабочих поверхностей, то снятие металла при балансировке в отдельных зонах приводит к снятию наклепа и неуправляемому перераспределению остаточных напряжений в поверхностном слое материала. Остающи-

еся после механической обработки риски на поверхности являются дополнительными концентраторами напряжений. Неоднородная структура в обрабатываемом материале, неравномерный припуск на обработку, сложный характер комплексных воздействий при формообразующих операциях изготовления рабочих колес насосов и ряд других факторов приводят к не-

однородному пластическому деформированию и неравномерной усталостной прочности поверхностного слоя в местах снятия металла и прилегающих зонах на ступице вблизи галтелей у корня лопатки (рис. 1). В результате действия указанных факторов на проточных поверхностях насосных агрегатов формируются нестабильные по площади и толщине поверхностного слоя физико-механические свойства, отрицательно влияющие в итоге на усталостную прочность лопаток [2].

Существенное влияние на свойства поверхностного слоя и усталостную прочность агрегата в целом оказывают механическая зачистка борфрезами и абразивная обработка. Значительно уменьшая шероховатость поверхности, зачистка формиру-

ет микронеровности, профиль которых характеризуется острыми вершинами и впадинами с малым радиусом закругления, которые служат концентраторами напряжений и обеспечивают недостаточную величину опорной поверхности. Из-за тепловых явлений в зоне резания абразивное шлифование образует в тонких слоях структурную неоднородность, приводит к снижению микротвердости, образованию остаточных напряжений растяжения, возрастанию количества остаточного аустенита и появлению поверхностных и приповерхностных микротрещин, первоначально малозаметных, так как они соизмеримы с величиной микровыступов и микровпадин шероховатого рельефа поверхности (рис. 2).

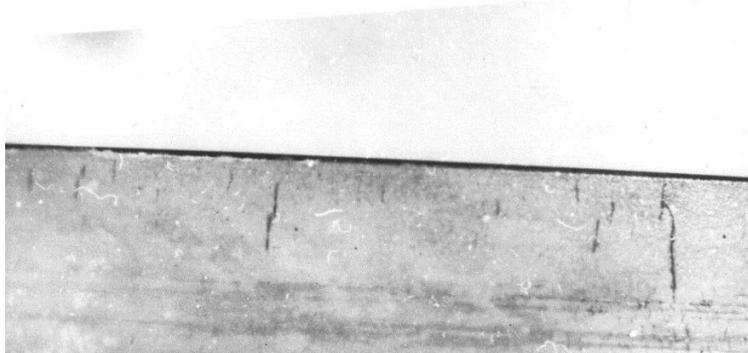


Рис. 2. Трещиноватый поверхностный слой после зачистки и полирования зоны снятия материала

Мероприятия по устранению шлифовочных прижогов часто не исключают полностью их образования. Все указанные дефекты шлифования могут наследоваться готовым изделием, вызывая снижение ресурса работы. Хотя с помощью широко применяемых методов окончательной обработки (полирование, доводка) сохраняются исходная форма деталей и шероховатость, но часто не обеспечиваются качество и заданные физико-механические свойства поверхностного слоя.

Предлагается требования по качеству поверхностного слоя материала достигать в зонах, подвергнутых зачистке по результатам балансировки (рис. 1), повторным комбинированным упрочнением микрошариками, при котором стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. В результате обработки упрочняется поверх-

ностный слой, вновь формируются остаточные напряжения сжатия, повышается усталостная прочность, стойкость к коррозионным воздействиям. Во многих случаях применением микрошариков удавалось повысить запасы усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, более чем в 2 раза [5].

В нашем случае предлагается комбинированная обработка турбин микрошариками после завершения балансировки и снятия «лишнего» материала. Экспериментальные исследования влияния режима и условий комбинированной струйно-динамической обработки плоских типовых образцов в газожидкостной токопроводящей среде на эффективность их поверхностного упрочнения проводились на установках эжекторного типа (рис. 3) [1].

Для исследования влияния режима и условий струйно-динамической обработки

плоских типовых образцов микрошариками на эффективность их поверхностного упрочнения использовались плоские образцы из закалённой стали У8А (твёрдость HRC 45...50, микротвёрдость $H_{0,49} = 3500$ МПа). Номинальные размеры образцов - 1,2x20x70 мм.

В качестве рабочей среды использовались стальные микрошарики диаметром 0,05...0,3 мм из порошка инструментальной стали Р6М5. При обработке применялся сопловой насадок с внутренним диаметром 10^{+1} мм. Расстояние вдоль оси сопла между его срезом и обрабатываемой поверхностью составляло $L = 50 \pm 10$ мм. Диаметр активной зоны потока рабочей среды (микрошариков) на этом расстоянии составлял 30 мм. Напряжение в системе -

2-10 В, расход газожидкостной слабопроводящей среды - 2 м³/мин.

Обработку образцов осуществляли при их вращении с имитатором детали в одной плоскости. Радиус вращения центров обрабатываемых поверхностей образцов - 100 мм, скорость вращения $n_{ep} = 100$ об/мин. Имитатор с плоскими образцами в камере струйно-динамической установки показан на рис. 3. Эксперимент проводился с числом опытов 8 и числом повторных опытов 3. Варьируемые в эксперименте факторы и их натуральные и кодированные уровни приведены в табл. 1. Время обработки участка поверхности t_1 устанавливалось в соответствии с временем $t_{обp}$ обработки вращающихся с оснасткой плоских образцов.

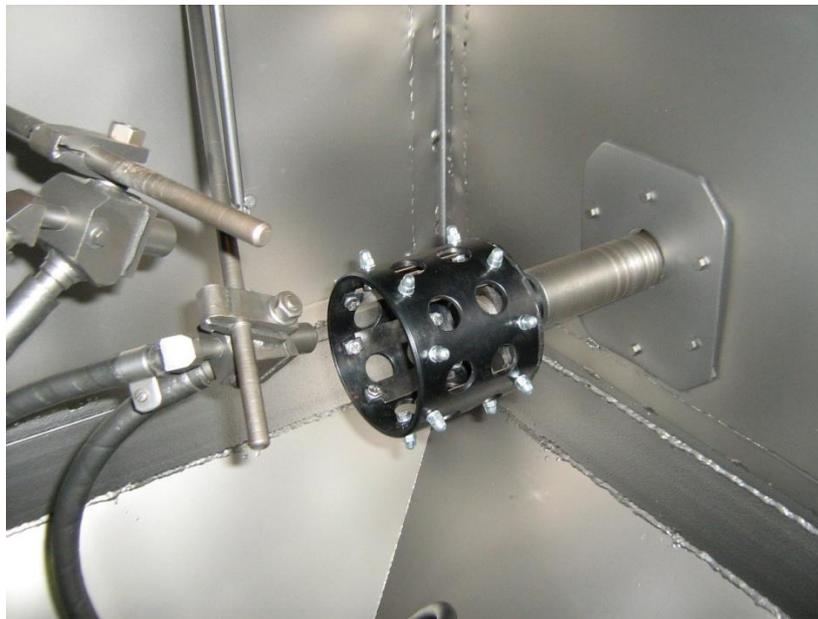


Рис. 3. Имитатор с плоскими образцами в камере струйно-динамической установки

$$t_{обp} = \left(\frac{\pi D_{ep}}{d_{аз}} \right) t_1,$$

где $D_{ep} = 100$ мм - диаметр вращения образцов в процессе обработки; $d_{аз} = 30$ мм - диаметр активной зоны потока рабочей среды на расстоянии 50 мм от среза сопла.

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Мера эффективности поверхностного упрочнения плоских образцов - глубина

наклёпа и величины остаточных напряжений сжатия. Поэтому величина $Z_{об}$ прогиба образцов определена как целевой параметр эксперимента. Величина $Z_{об}$ измерялась с точностью $\pm 0,01$ мм [1]. База измерений составляла 70 мм.

Таблица 1

Варьируемые факторы и их натуральные и кодированные уровни

№ п/п	Варьируемые факторы	Обозначение	Размерность	Код	Уровни факторов			Интервал варьирования
					+	0	-	
1	Избыточное давление воздуха в пневмосистеме установки	P	МПа	X_1	0,3	0,25	0,2	0,05
2	Время обработки участка поверхности вращающегося образца	t_1	с	X_2	60	30	10	20
3	Угол соударения рабочей среды и поверхности образца	α	град	X_3	90	60	30	30
4	Параметр достижимой шероховатости поверхности образца	$R_{a\text{ucx}}$	мкм	X_4	1,8	1,2	0,6	0,6

Зависимость целевого параметра $Y = Z_{об}$ от совокупности варьируемых факторов представлена в виде неполного квадратичного уравнения:

$$Y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4.$$

После начисления коэффициентов этого уравнения по данным табл. 2, оценки их значимости по критерию Стьюдента (для 5 %-го уровня значимости) и исключения незначимых коэффициентов уравнение имеет вид

$$Y = 0,456 + 0,021x_1 + 0,034x_2 + 0,395x_3 - 0,094x_4 - 0,021x_1x_2.$$

По абсолютным величинам коэффициентов уравнения регрессии можно сделать вывод о том, что на величину прогиба образцов наибольшее влияние оказывают угол соударения рабочей среды с обрабатываемой поверхностью и исходная шероховатость этой поверхности.

После перехода от кодированных к натуральным значениям факторов уравнение регрессии имеет вид

$$Z_{об} = -0,364 + 1,68P + 0,014t_1 + 0,01\alpha - 0,15R_{a\text{ucx}} - 0,042Pt_1.$$

На рис. 4 показаны графики зависимости $Z_{об} = f(\alpha, t_1, R_{a\text{ucx}})$ для типовых плоских образцов из стали У8А. Анализ зависимостей показывает, что уменьшение угла соударения значительно уменьшает достижимую величину прогиба образцов $Z_{об}$. Достижимая шероховатость поверхности тоже значительно влияет на величину $Z_{об}$, так как установлено, что увеличение давления P уменьшает влияние достижимой шероховатости поверхностей образцов на величину их прогиба.

Экспериментальное определение влияния времени обработки участка поверхности на прогиб образцов из различных материалов осуществлялось при одинаковых условиях обработки: $P = 0,3$ МПа, $\alpha = 60^\circ$, $L = 50$ мм, $n_{ep} = 100$ об/мин, $R_{a\text{ucx}} = 0,4$ мкм (рис. 5). Образцы изготовлялись из следующих материалов: У8А, ЭП741П, 07Х16Н6, ВНЛ-1М, 12Х18Н10Т. Все образцы, кроме образцов из стали У8А, были термообработаны по технологии натуральных деталей, изготовляемых из этих материалов

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	$\bar{Y} = \bar{Z}_{об}$
1	+	+	-	-	+	-	-	0,22
2	-	-	-	-	+	+	+	0,12
3	+	-	-	+	-	-	+	0,04
4	-	+	-	+	-	+	-	0,01
5	+	+	+	+	+	+	+	0,76
6	-	-	+	+	+	-	-	0,64
7	+	-	+	-	-	+	-	0,89
8	-	+	+	-	-	-	+	0,97
9	0	0	0	+	0	0	0	0,51
10	0	0	0	-	0	0	0	0,64

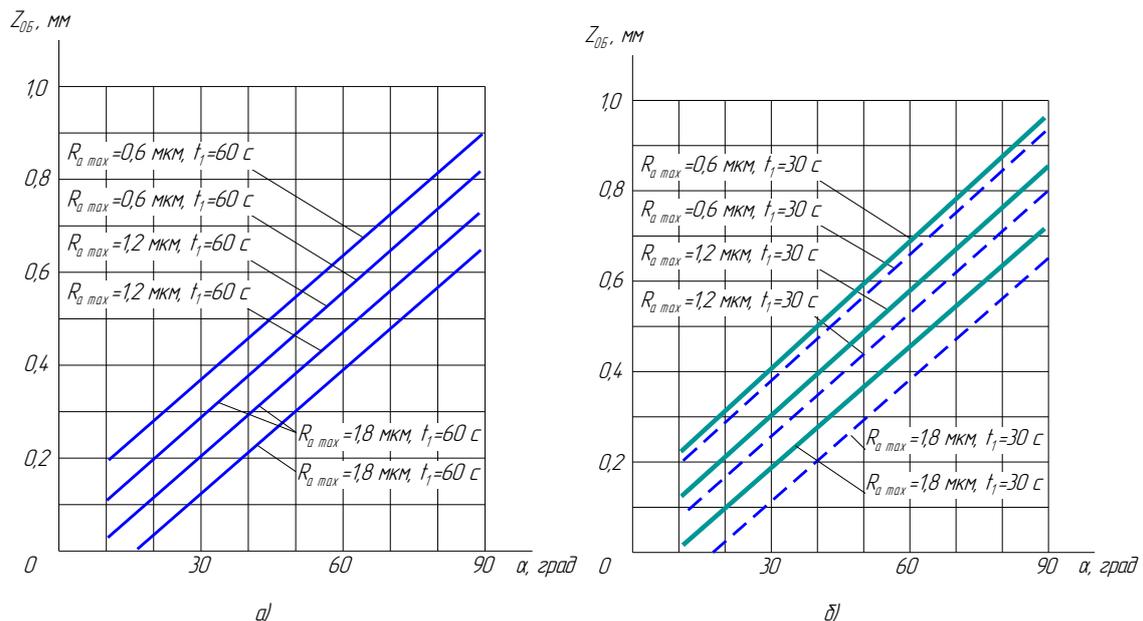


Рис. 4. Графики зависимости $Z_{об} = f(\alpha, t_i, R_{a\text{исх}})$ для плоских типовых образцов из стали У8А при $P=0,3$ МПа: а - без газожидкостной среды; б - с газожидкостной средой

Для обработки использовали по 3 образца из каждого указанного материала, а результаты обработки определяли как среднее арифметическое определяемых величин. Графики изменения шероховатости поверхностей образцов по времени t_{ynp} обработки показаны на рис. 6.

Зависимости $Z_{об} = f(t_{ynp})$ (рис. 5) позволяют сделать вывод о том, что наибольшей склонностью к пневмодробеструйному поверхностному упрочнению стальными микрошариками обладают сплавы ЭП741П, 07Х16Н6, ВНЛ-1М. Из графиков зависимости $R_a = f(t_{ynp})$ (рис. 6) следует,

что параметр R_a шероховатости поверхностей, достижимый при пневмодробеструйной обработке в течение 40 с микрошариками диаметром 0,05...0,3 мм, составляет [3]:

- для сталей ЭП741П и 07Х16Н6 $R_a = 1,9...2,3$ мкм;
- для сталей 12Х18Н10Т и У8А $R_a = 1,35...1,7$ мкм.

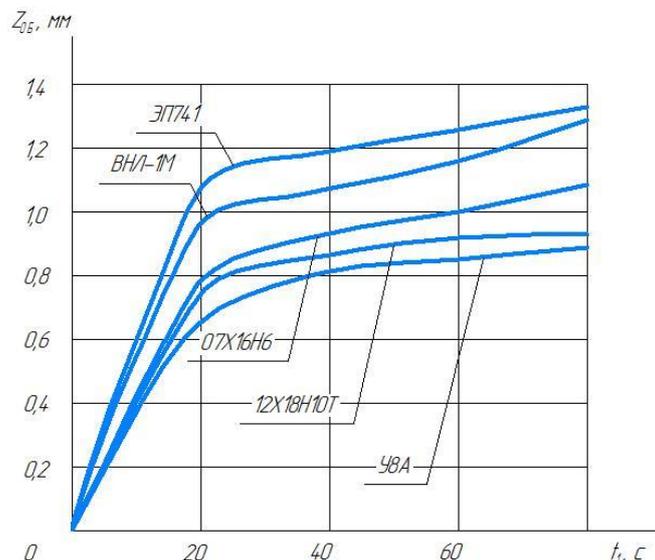


Рис. 5. Графики зависимости прогиба плоских образцов из различных материалов от времени t_1 их обработки в одинаковых условиях ($P = 0,3$ МПа, $\alpha = 90^\circ$, $R_{a\text{исх}} = 0,4$ мкм)

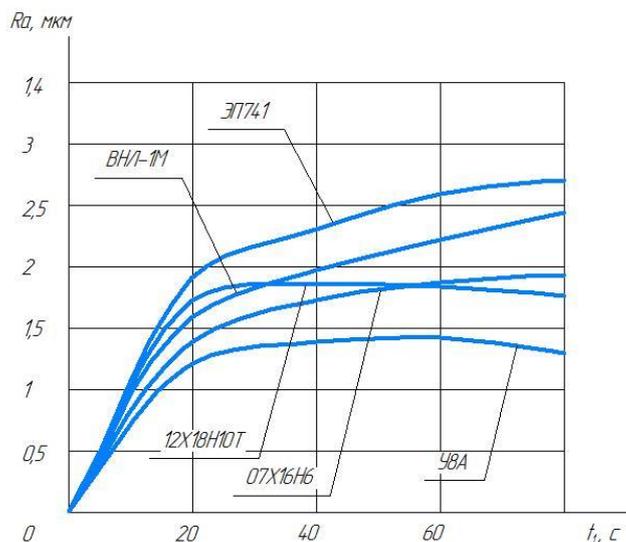


Рис. 6. Графики зависимости шероховатости плоских образцов из различных материалов от времени t_1 их обработки в одинаковых условиях ($P = 0,3$ МПа, $\alpha = 60^\circ$, $R_{a\text{исх}} = 0,4$ мкм)

Существующие в настоящее время техпроцессы изготовления деталей предусматривают выполнение операций их пневмодробеструйного упрочнения при времени обработки участков поверхностей $t_1 = 60 \pm 5$ с. По результатам данного эксперимента для повышения эффективности обработки деталей можно рекомендовать

ограничение времени обработки до $t_1 = 40 \pm 5$ с, особенно для деталей, изготавливаемых из сплавов ЭП741П и ВНЛ-1М. При этом достижимые параметры R_a шероховатости обрабатываемых поверхностей можно снизить относительно вышеуказанных значений за счет оптимизации угла подачи шариков. Взаимосвязь показателей каче-

ства дробеструйного упрочнения (при $t_l = 40$ с) плоских образцов из различных материалов иллюстрируются данными табл. 3, где:

$K_{пр}$ - отношение прогиба образца из материала детали к прогибу контрольного образца из стали У8А;

$K_{нг}$ - отношение глубины наклёпа образца из материала детали к глубине

наклёпа контрольного образца из стали У8А;

$K_{ндс}$ - отношение степени наклёпа образца из материала детали к степени наклёпа контрольного образца из стали У8А.

Состояние поверхности плоских образцов-свидетелей после комбинированной обработки показано на рис. 7.

Таблица 3

Исходные механические характеристики плоских образцов из различных материалов и показатели их пневмодробеструйного поверхностного упрочнения в одинаковых условиях ($t_l = 40$ с, $P = 0,3$ МПа, $\alpha = 90^\circ$, $R_{a\text{ усx}} = 0,4$ мкм)

№ п/п	Марка материала	Предел текучести $\sigma_{тн}$, МПа	Твёрдость НВ, МПа	Прогиб образцов $Z_{об}$, мм	Глубина наклёпа $a_{н об}$, мм	Микротвёрдость наклёпанного слоя $H_{0,49}$, МПа	Степень наклёпа $\varepsilon_{нс}$, %	$K_{пр}$	$K_{нг}$	$K_{ндс}$
1	ЭП741П	870	3100	0,80	0,045	3100	24	1	1	1
2	07X16H6	840	3050	0,82	0,050	3200	30	1,04	1,13	3,2
3	ВНЛ-1М	790	2350	0,85	0,070	3050	29	1,08	1,44	4,5
4	12X18H10T	420	2050	1,10	0,060	2100	44	1,43	1,52	5,1



Рис. 7. Плоские образцы-свидетели после комбинированной обработки в течение 40 с

Результаты экспериментального исследования процесса комбинированной обработки плоских контрольных образцов микрошариками показали, что относительная погрешность расчетного опреде-

ления промежуточных и максимально допустимых высотных параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей по сравнению с их действительными значениями не превышает ± 5 %. Технологически

наследованный дефектный слой устранен на 30-40 %. В настоящее время проводятся исследования комбинированных методов обработки, призванных снизить на 70-80 %

влияние нежелательной технологической наследственности в поверхностном слое лопаточных деталей в процессе их балансировки и доводки в составе ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 286 с.
2. Сухочев, Г.А. Технологические методы повышения эксплуатационных показателей транспортных машин в экстремальных условиях / Г.А. Сухочев // *Техника машиностроения*. – 2005. – № 3. – С. 52-54.
3. Сухочев, Г.А. Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов / Г.А. Сухочев, В.Н. Сокольников, С.Н. Коденцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2016. – № 2 (316). – С. 99-105.
4. Сухочев, Г.А. Повышение усталостной прочности поверхностей сложного профиля / Г.А. Сухочев, В.П. Смоленцев, Н.К. Мешков, В.А. Пожидаев // *Наука - производству*. – 1999. – № 10. – С. 47-48.
5. Сухочев, Г.А. Технологическое обеспечение качества лопаточных деталей с использованием наукоемких нетрадиционных методов обработки / Г.А. Сухочев, А.В. Капустин, Е.Г. Смольяникова, Д.М. Небольсин // *Насосы. Турбины. Системы*. – Воронеж: Научная книга, 2011. – № 1. – С. 34-42.
1. Sukhochev, G.A. *Quality Control of Products Operated under Extreme Conditions at Transient Impacts* / G.A. Sukhochev. – Voronezh: VSU, 2003. – pp. 286.
2. Sukhochev, G.A. Technological methods for operation properties increase in transport machines under extreme conditions / G.A. Sukhochev // *Technique of Mechanical Engineering*. – 2005. – No.3. – pp. 52-54.
3. Sukhochev, G.A. Technological aspects of high-speed rotor balancing / G.A. Sukhochev, V.N. Sokolnikov, S.N. Kodentsev // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology*. – 2016. – No.2 (316). – pp. 99-105.
4. Sukhochev, G.A. Fatigue strength increase in complex profile surfaces / G.A. Sukhochev, V.P. Smolentsev, N.K. Meshkov, V.A. Pozhidaev // *Science for Production*. – 1999. – No.10. – pp. 47-48.
5. Sukhochev, G.A. Technological support of blade parts quality using science intensive nonconventional methods of processing / G.A. Sukhochev, A.V. Kapustin, E.G. Smoliyannikova, D.M. Nebolsin // *Pumps. Turbines. Systems*. – Voronezh: Scientific Book, 2011. – No.1. – pp. 34-42.

Статья поступила в редакцию 26.03.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Киричек А.В.

Статья принята к публикации 27. 05. 19.

Сведения об авторах:

Сокольников Василий Николаевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета, e-mail: sokolnikovv@inbox.ru.

Sokolnikov Vasily Nikolaevich, Post graduate student of the Dep. "Engineering Technique", Voronezh State Technical University, e-mail: sokolnikovv@inbox.ru.

Сухочев Геннадий Алексеевич, профессор кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета, e-mail: suhotchev@mail.ru.

Sukhochev Gennady Alexeevich, Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Voronezh State Technical University, e-mail: suhotchev@mail.ru.