

УДК 620.17: 620.19

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА XSTRESS ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Карманов В.В.¹, Трофимов В.Н.¹, Нуртдинов А.С.¹, Звонов С.Н.²¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия² ООО «КСЕНА», г. Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения роботизированного комплекса для измерения технологических остаточных напряжений. Приведены обоснование выбора метода рентгеновской дифрактометрии для измерения напряжений. Дано описание роботизированного комплекса. Приведены описание и результаты измерений на плоских и круглых образцах, на детали сложной формы. Сделаны выводы о преимуществе применения роботизированного комплекса для контроля остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, роботизированный комплекс, измерение, рентгеновская дифрактометрия.

Введение

Одним из основных направлений повышения эксплуатационных характеристик изделий транспортного, энергетического и химического машиностроения является совершенствование технологических процессов их изготовления с целью повышения ресурса и исключения преждевременного разрушения.

Опыт эксплуатации различных конструкций показывает, что разрушение чаще всего связано с появлением поверхностных трещин. Одним из факторов, стимулирующих их появление и развитие, являются остаточные напряжения.

Остаточные макронапряжения или, по классификации Давиденкова Н.Н., остаточные напряжения 1 рода (далее RS_1 – residual stresses) возникают в изделиях, подвергаемых термообработке, обработке резанием, давлением, сваркой. В зависимости от знака и величины RS_1 оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на статическую и циклическую прочность, ползучесть, коррозионную стойкость, коррозионное растрескивание нагруженных конструкций и деталей [1].

В связи с этим при производстве ответственных изделий машиностроения, наряду с традиционными геометрическими и механическими параметрами (шероховатость, модуль Юнга, предел прочности и др.), начинают использовать параметры, позволяющие контролировать процессы, связанные с изменением структуры материала изделия в процессе его производства, в частности уровень остаточных напряжений. На основе результатов контроля возможно проведение корректировки на этапе проектирования и освоения технологии изготовления изделия и отбраковки при его серийном производстве. Результаты контроля также могут быть использованы при создании баз данных и построении ма-

тематических моделей различных технологических процессов, что позволит прогнозировать уровень остаточных напряжений на конечной стадии производства изделий.

Метод исследования

Для ответственных деталей, характеризующихся высокой стоимостью материала и сложностью изготовления, актуальной задачей является контроль RS_1 на поверхности элементов конструкций на всех этапах технологического процесса их производства.

В связи с вышесказанным, можно сформулировать требования, предъявляемые к методу и оборудованию для контроля RS_1 в лабораторных условиях и условиях производства:

- метод должен быть неразрушающим;
- метод должен быть применим для широкого круга конструкционных металлов и сплавов, имеющих различные свойства и структуру (черных и цветных, магнитных и парамагнитных и др.);
- метод должен иметь отработанную научно-методическую базу для достоверной идентификации результатов измерений;
- результаты измерений должны быть применимы для калибровки других методов измерений RS_1 ;
- оборудование должно позволять измерять RS_1 на поверхности изделий сложной геометрии.

В настоящее время существует достаточно большое количество неразрушающих методов контроля остаточных напряжений: акустические методы (например, метод поверхностных волн Рэлея); рентгеновский метод; метод дифракции нейтронов; магнитострикционный метод; токовыхревой метод; метод, основанный на эффекте Баркгаузена [3,4].

Одним из наиболее эффективных неразрушающих методов контроля RS_1 является метод рентгеновской дифрактометрии.

Метод рентгеновской дифрактометрии основан на измерении относительной деформации кристаллической решетки металла при температурном воздействии, при приложении внешних нагрузок, а также при действии остаточных напряжений [5, 6]. Расчёт остаточных напряжений производится по результатам измерений с использованием соотношений теории упругости. При отсутствии внешних нагрузок результаты расчёта определяют величину остаточных напряжений.

Отметим основные достоинства и недостатки метода по сравнению с известными методами:

- в процессе измерений не повреждается поверхность изделия, так как отсутствует контакт с элементами измерительного оборудования;
- метод не привязан к ненапряженному состоянию поликристаллического материала, так как в расчёте RS_1 используются параметры идеальной ненапряженной кристаллической решетки;
- метод позволяет определять RS_1 в заданных точках поверхностей, имеющих сложную геометрию;
- метод может быть использован в лабораторной практике для определения поверхностных RS_1 , обусловленных технологическими процессами термообработки, науглероживания, дробеструйной обработки, механической обработки резанием и условиями эксплуатации (например, усталостью) [7];
- высокая стоимость оборудования и его эксплуатации;
- повышенные требования к безопасности персонала.

Несмотря на указанные недостатки, метод рентгеновской дифрактометрии может быть признан наиболее эффективным для организации контроля технологических RS_1 .

Измерительный комплекс

Учитывая широкую номенклатуру изделий машиностроения и большое разнообразие технологических процессов их изготовления, для реализации метода рентгеновской дифрактометрии на базе кафедры «Инновационные технологии материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета была создана лаборатория, основой которой является измерительный комплекс компании XSTRESS на базе робота-манипулятора «KUKA».

Измерительный комплекс (рис. 1) включает следующие компоненты:

- камера 1 для защиты робота от механических повреждений и персонала от воздействия рентгеновского излучения;
- 6-ти осевой робот-манипулятор 2 с возможностью перемещения вдоль оси камеры при измерениях крупногабаритных деталей;

– патрон 3 (рис. 2) и вращающийся центр 4 для проведения измерений на поверхности крупногабаритных валов и осей, а также тел вращения, имеющих осевую симметрию (зубчатые колёса, диски и др.);

– система управления роботом-манипулятором на базе программируемой консоли, оснащенной промышленным дисплеем;

– гониометр 5 с источником и датчиками регистрации рентгеновского излучения;

– система обработки результатов измерения с использованием ПК и специализированного программного обеспечения;

– комплект для определения модуля Юнга материала исследуемых деталей с использованием плоских образцов.

Использование роботизированного измерительного комплекса позволяет решить ряд важных задач при проведении измерений и контроля RS_1 :

- практически полностью исключить влияние человеческого фактора на результаты измерений RS_1 ;
- обеспечить автоматическую регистрацию, протоколирование и сохранение полученных результатов измерения RS_1 ;
- максимально сократить время подготовки к работе при проведении многократных периодически повторяющихся измерений за счёт возможности разработки, корректировки и хранения управляющих программ для робота-манипулятора;
- определять RS_1 в заданных точках поверхностей произвольной геометрии;
- проводить измерения в режиме реального времени.

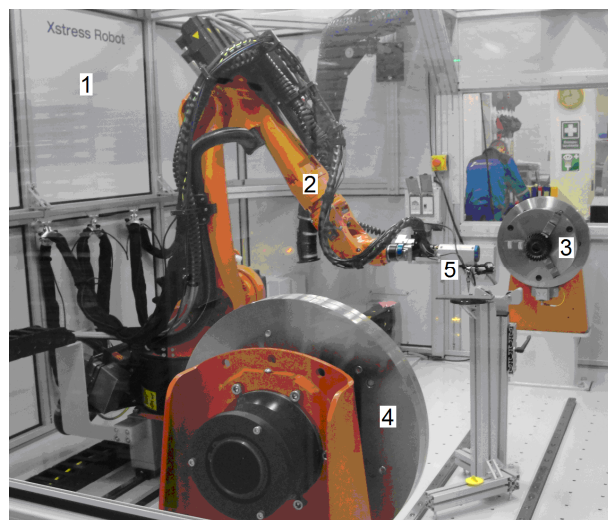


Рис. 1. Общий вид роботизированного комплекса:
1 – камера; 2 – робот-манипулятор; 3 – патрон;
4 – вращающийся центр; 5 – гониометр

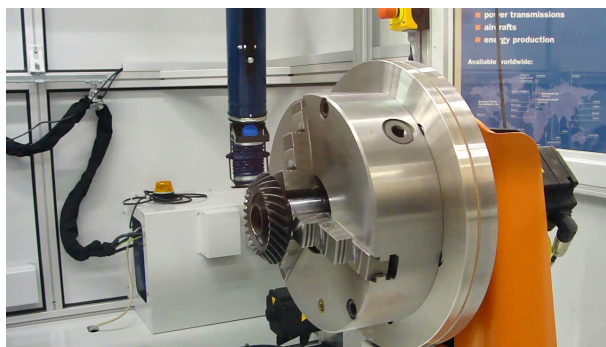


Рис. 2. Патрон с установленным коническим зубчатым колесом

Для измерения RS_1 в измерительном комплексе используется гониометр (рис. 3), установленный на консоли робота-манипулятора. Основные технические характеристики гониометра приведены в табл. 1.

Программное обеспечение, входящее в состав комплекса, позволяет определить главные нормальные напряжения для плоского напряженного состояния, реализуемого на поверхности деталей.

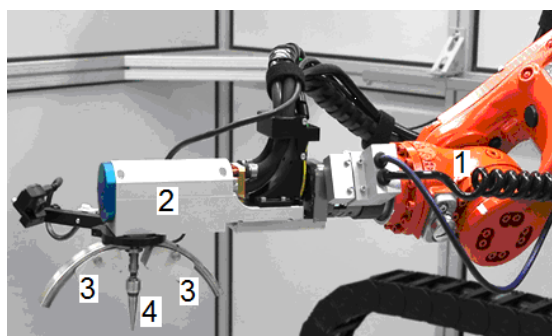


Рис. 3. Общий вид гониометра:
1 – консоль робота-манипулятора; 2 – головка гониометра; 3 – датчики рентгеновского излучения; 4 – коллиматор

Таблица 1

Технические характеристики гониометра

Параметр	Единица измерения	Величина
1. Точность позиционирования гониометра относительно точки измерения	мм	$\pm 0,003$
2. Угловое разрешение линейных датчиков изображения	град/пиксель	$0,014 \div 0,057$
3. Диапазон 2θ	град	$125 \div 162$
4. χ -наклон (программируемый)	град	$-60 \div +60$
5. χ -осцилляция (программируемая)	град	$0 \div \pm 6$
6. ϕ -осцилляции (с пошаговой регулировкой)	град	± 180
7. Тип рентгеновской трубки		Cr, Ti
8. Размер пятна, обеспечиваемый комплектом коллиматоров	мм	$1 \div 5$

Результаты исследования

Рассмотрим ряд примеров определения RS_1 в образцах и изделиях из различных материалов.

1. Определение RS_1 в плоских образцах из стали 45.

Образцы вырезались из листа толщиной 3 мм. Режимы термомеханической обработки образцов приведены в табл. 2. Измерение производилось в центральной части образцов. Схема измерений приведена на рис. 4. Результаты измерений для некоторых образцов приведены в табл. 3.

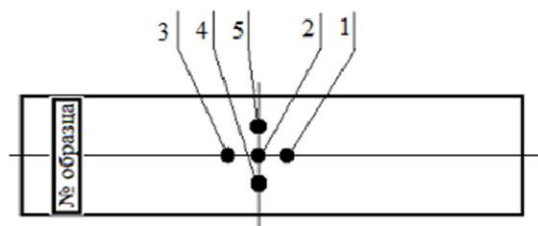


Рис. 4. Схема измерений (указаны номера точек измерения)

Таблица 2

Режимы механической обработки

Номер образца	Режимы обработки (до обработки – отпуск при температуре 300°C)
1	– шлифование: линейная скорость шлифовального круга 23,1 м/с
2	– шлифование: линейная скорость шлифовального круга 23,1 м/с; – полирование: линейная скорость полировального круга 23,6 м/с; полировочный компонент: паста ГОИ

Таблица 3

Результаты измерения остаточных напряжений

Номер образца	Точка измерения	σ_1 до обработки (после отпуска), МПа	σ_1 после обработки, МПа
1	1	$186 \pm 9,2$	$300,6 \pm 12,4$
	2	$230,7 \pm 12,6$	$281,9 \pm 14,8$
	3	$214,7 \pm 10,3$	$270,1 \pm 13,3$
	4	$189 \pm 14,6$	$285,1 \pm 13,3$
	5	$185,4 \pm 14,7$	$263,5 \pm 11,2$
2	1	$297,7 \pm 14,3$	$-159,1 \pm 5,4$
	2	$260 \pm 7,4$	$-188,2 \pm 7,2$
	3	$240,7 \pm 3,2$	$-181 \pm 8,3$
	4	$201,9 \pm 8,7$	$-168,1 \pm 7,9$
	5	$284 \pm 7,5$	$-181,3 \pm 8,9$

Анализ полученных результатов показывает, что, независимо от режимов, при шлифовании в поверхностных слоях образцов возникают растягивающие OH_1 , а при полировании – сжимающие. Последующая операция полирования после операции шлифовки способствует смене знака напряжений с положительного на отрицательный, что является благоприятным фактором. Таким образом, операцию полирования можно рекомендовать в качестве финишной.

2. Определение остаточных напряжений в стандартных образцах из сплава ВТ6 (рис. 5).

Образцы изготавливались из стандартного круглого проката на станке-автомате. Финишная операция – полирование.



Рис. 5. Образец для определения RS_1 в сплавах ВТ6

Результаты измерения $ОН_1$ представлены в табл. 4.

Таблица 4
Остаточные напряжения в стандартных образцах из сплава ВТ6

Номер образца	σ_2 , МПа		σ_3 , МПа	
	1-е измерение	2-е измерение	1-е измерение	2-е измерение
1	$-98,8 \pm 19,8$	$-94,7 \pm 18,5$	$-320,7 \pm 19,8$	$-330,4 \pm 21,2$
2	$-164,1 \pm 22,7$	$-166,3 \pm 21,2$	$-322,3 \pm 22,7$	$-324,1 \pm 18,5$
3	$134,3 \pm 28,3$	$129,1 \pm 29,6$	$-419,1 \pm 28,3$	$-425,6 \pm 27,2$
4	$-146,5 \pm 21,6$	$-150,2 \pm 24,4$	$-330,0 \pm 21,6$	$-327,0 \pm 25,6$

Результаты измерений подтверждает полученный ранее вывод о положительном влиянии операции полирования на знак $ОН_1$. Повторное измерение в той же точке дает схожие значения в пределах погрешности. На основании этого можно сделать вывод о том, что данный роботизированный комплекс обеспечивает повторяемость измерений.

3. Определение RS_1 на поверхности детали сложной формы (лопатка турбины ГТД).

Для позиционирования детали использовалось специальное приспособление (рис. 6).



Рис. 6. Закрепление лопатки турбины ГТД в специальном приспособлении

Измерения проводилось в точке перехода от пера к замку лопатки. Аналогичное исследование на данной лопатке проводилось в компании Stresstech Oy (Finland). Результаты измерения RS_1 приведены в табл. 5.

Таблица 5
Остаточные напряжения на пере лопатки

Точка	$\sigma_3(\varphi=0^\circ)$		FWHM	
	МПа	\pm МПа	МПа	\pm МПа
1	-752,7	150,3	-828	230

Анализируя данные об остаточных напряжениях в точке перехода от пера к замку лопатки, можно сделать вывод об унификации измерений по методу рентгеновской дифрактометрии при применении робота.

Выводы

1. Приведенные результаты показывают широкие возможности применения роботизированного измерительного комплекса для исследования влияния различных технологических операций на величину и знак остаточных макронапряжений.

2. Опыт авторов показывает, что существуют оптимальные режимы измерений по углу наклона и числу осцилляций гониометра, которые выбираются опытным путём и зависят от количества измерений и требований к точности результатов измерений.

3. Применение роботизированного комплекса обеспечивает повторяемость результатов и унификацию технологии измерений на различных видах и типоразмерах деталей.

4. Результаты исследований могут использоваться при создании баз данных и математических моделей для проектирования вновь разрабатываемых технологических процессов, а также для оптимизации существующих технологических процессов.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218.

Список литературы

1. Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, vol. 46 (14), pp. 1786–1794.
2. Создание методики моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и расчет деформации пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями / Смирнов Г.В., Демин М.В., Смелое В.Т., Артамонов М.Ю. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического уни-

- верситета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2006. № 2–1. С. 94–99.
3. Рукавишников И.В. Разработка средств и метода магнитных шумов для контроля остаточных напряжений в стойках шасси летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
 4. Апальков А.А. Исследование остаточных напряжений в элементах конструкций ЯЭУ методом сверления отверстий и цифровой спекл интерферометрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.03. М., 2005. 173 с.

5. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов. М.: МИСиС, 2002. 360 с.
6. Трофимов В.В., Башкарев А.Я., Краус И. Рентгеновская тензометрия – это так просто // В мире неразрушающего контроля. 2005. №1(27), С. 28–32.
7. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газойл пресс, 2005. 608 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EXPERIENCE IN APPLICATION OF THE XSTRESS ROBOT SYSTEM TO MEASURE TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES

Karmanov Vadim Vladimirovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Innovative Manufacturing Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-15-08. E-mail: karmanovs@yandex.ru.

Trofimov Viktor Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-13-49. E-mail: tvn_perm@pstu.ru.

Nurtdinov Anton Sergeevich – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Russia. Phone: +7 (342) 239-15-08. E-mail: anton.nurtdinov@gmail.com.

Zvonov Sergey Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Director of LLC KSENA, Perm, Russia. Phone: +7 (342) 218-21-95. E-mail: info@kcena.ru.

Abstract. The article describes the experience in application of the robot system to measure technological residual stresses. The substantiation of the stress measurement method by X-ray diffractometry is shown. A description of the robot system is given. A description and results of measurement of flat and round samples, complex parts are given. Conclusions about the superiority of the robot systems used for the residual stresses control are made.

Keywords: residual stresses, robot system, measurement, X-ray diffractometry.

References

1. Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, no. 46 (14), pp. 1786-1794.
2. Smirnov G.V., Demin M.V., Smeloe V.T., Artamonov M.Yu. Sozdanie metodiki modelirovaniya ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnom sloe pera lopatki i raschet deformatsii pera lopatki posle snyatiya sloya s ostatochnymi napryazheniyami [Establishment of a simulation procedure for residual stress on the surface of the gas-turbine engine blades and determination of blade deformation after removal of the surface with residual stress]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo*

universiteta) [Bulletin of Academician Korolev Samara State Aerospace University], 2006, no. 2-1, pp.94-99.

3. Rukavishnikov I.V. *Razrabotka sredstv i metoda magnitnykh шумов dlya kontrolya ostatochnykh napryazheniy v stoykakh shassi letatelnykh apparatov* [Development of the means and methods of magnetic noise control of residual stresses in landing gear of aircraft]. Ph.D. dissertation. Moscow, 2006.
4. Apalkov A.A. *Issledovanie ostatochnykh napryazheniy v elementakh konstruksii YaEU metodom sverleniya otverstiy i tsifrovoy spekl interferometrii* [Investigation of residual stresses in NPP structural elements by drilling holes and digital speckle interferometry]. Ph.D. dissertation. Moscow, 2005, 173 p.
5. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow: MISIS, 2002, 360 p.
6. Trofimov V.V., Bashkarev A.Ya., Kraus I. *Rentgenovskaya tenzometriya - eto tak prosto* [X-ray strain measurement - it's so simple]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [In the world of non-destructive testing], 2005, no. 1 (27), pp. 28-32.
7. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov* [Fundamentals of comprehensive diagnostics of northern pipelines]. *Nazemnye issledovaniya* [Ground survey]. Moscow: Gasoil Press, 2005, 608 p.