

**ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПОСЛЕ ВИБРОУДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ**

Галимов Энгель Рафикович

*доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой материаловедения,
сварки, и производственной безопасности
Института авиации, наземного транспорта и энергетики,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
Казань, Россия
E-mail: 89871726737@mail.ru*

Тюрин Андрей Викторович

*аспирант, ассистент кафедры материаловедения,
сварки, и производственной безопасности
Института авиации, наземного транспорта и энергетики,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
Казань, Россия
E-mail: kai.tyurin@gmail.com*

Предмет исследования: методика определения остаточных напряжений первого рода, в образцах, которые вырезаны из лонжерона после виброударного упрочнения.

Цель исследования: совершенствование физической адекватности методики определения остаточных напряжений.

Объект исследования: остаточные напряжения и алгоритм их обработки. В исследовании использован измененный порядок аппроксимации исходных данных, полученных с датчиков.

Основные результаты исследования: представлен новый алгоритм обработки экспериментальных данных, который позволяет получить более совершенные результаты исследований остаточных напряжений в образцах. Для реализации алгоритма разработана математическая модель обработки данных. Данная математическая модель определения остаточных напряжений в структуре имеет измененный порядок аппроксимации данных, полученных с датчиков. Аппроксимация полиномом шестой степени происходит до расчета эпюры и ее построения, а не после ее построения и последующего сглаживания, как было реализовано ранее. Данное техническое решение способствует повышению точности и корректности исследований определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, виброударное упрочнение, образец, методика, математическая модель.

MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES AFTER VIBROIMPULSIVE HARDENING OF SPECIMEN

Engel R. Galimov

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Materials Science,
Welding, and Industrial Safety Institute of Aviation,
Ground Transport and Energy Kazan National Research
Technical University named after A.N. Tupolev–KAI
Kazan, Russia
E-mail: 89871726737@mail.ru*

Andrey V. Tyurin

*Postgraduate Student,
Assistant of the Department of Materials Science,
Welding, and Industrial Safety Institute of Aviation,
Ground Transport and Energy Kazan National Research
Technical University named after A.N. Tupolev–KAI
Kazan, Russia
E-mail: kai.tyurin@gmail.com*

Subject of research: technique for determining residual stresses of the first kind, in samples that are cut from the spar after vibration shock hardening.

Purpose of research: to increase the accuracy, as well as to improve the methodology for determining residual stresses.

Methods and objects of research: the object of the study is residual stresses and the algorithm of their processing. The study used a modified order of approximation of data obtained from sensors.

Main results of research: a new algorithm for processing experimental data is presented, which allows us to obtain more advanced results of studies of residual stresses in samples. A mathematical model of data processing has been developed to implement the algorithm. This mathematical model for determining residual stresses in the structure has a modified order of approximation of data obtained from sensors. Approximation by a polynomial of the sixth degree occurs before the plot is calculated and constructed, and not after its construction and subsequent smoothing, as was implemented earlier. This technical solution contributes to improving the accuracy and correctness of studies for determining residual stresses.

Keywords: residual stresses, vibration shock hardening, sample, methodology, mathematical model.

Введение

В процессе производства в деталях возникают технологические остаточные напряжения. Остаточными (собственными, внутренними, технологическими) называют напряжения, существующие в конструкции при отсутствии внешних силовых, тепловых и других воздействий. В основу определения остаточных напряжений первого рода положен метод, разработанный Давиденковым Н.Н. и Биргером И.А. [1, 2]. Метод успешно зарекомендовал себя в промышленности, однако есть пути совершенствования обработки экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение

Образование остаточных напряжений связано с неоднородными объемными изменениями (деформациями материала по сечению детали), которые вызывают искажения кристаллической решетки.

Представленная в работе методика регламентирует процесс определения остаточных напряжений в образцах, вырезанных из лонжерона, после виброударного упрочнения. Лонжерон должен иметь технологический паспорт с отметкой БТК о приемке его по операциям механической обработки и результатов испытаний образцов, изготовленный из сплава Д16-Т.

Рассмотрим бесконечно тонкий срез толщиной da . Действие сил, возникающих после удаления этого среза, эквивалентно приложению к стержню изгибающего момента:

$$dM = \frac{1}{2} \sigma^*(a) \cdot b \cdot (h - a) \cdot da,$$

где σ^* – исследуемое напряжение, l – длина образца, b – ширина стержня, h – толщина образца, a – толщина удаляемого материала.

Для любого стержня, к которому приложен изгибающий момент M , максимальный прогиб, т.е. прогиб (ε) в середине длины стержня равен:

$$\varepsilon = \frac{M \cdot l^2}{8E \cdot I},$$

В нашем случае (для стержня прямоугольного сечения) момент инерции (I) равен:

$$I = \frac{b(h-a)^3}{12}$$

При приращении изгибающего момента dM приращение прогиба стержня будет соответственно равно:

$$d\varepsilon = \frac{l^2}{8E \cdot I} dM$$

Следовательно,

$$d\varepsilon = \frac{l^2 \cdot 12}{8E \cdot b(h-a)^3} \cdot \frac{1}{2} \sigma^*(a) \cdot b(h-a) \cdot da = \frac{3}{4} \cdot \frac{l^2}{E(h-a)^2} \sigma^*(a) da,$$

$$\sigma^*(a) = \frac{4E(h-a)^2}{3l^2} \frac{d\varepsilon}{da}$$

Уравнение касательной к параболе в точке x

$$y' = 2Ax + B, \Rightarrow y'(x) = 2Ax + B$$

Определение коэффициентов параболы, проходящей через 3 точки с координатами $(x_1; y_1); (x_2; y_2); (x_3; y_3)$.

Составим систему:

$$\begin{cases} y_1 = Ax_1^2 + Bx_1 + C \\ y_2 = Ax_2^2 + Bx_2 + C \\ y_3 = Ax_3^2 + Bx_3 + C \end{cases}$$

где A, B, C – неизвестные коэффициенты данной параболы.

Полученное выражение показывает, что напряжение, действующее в слое перед его удалением, пропорционально отношению приращения прогиба $d\varepsilon$ к толщине снятого слоя da .

$$\Delta_C = \begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = y_3 x_1^2 x_2 + y_2 x_1 x_3^2 + y_1 x_2^2 x_3 - y_1 x_2 x_3^2 - y_3 x_1 x_2^2 - y_2 x_1^2 x_3$$

где $C = \frac{\Delta_C}{\Delta}$ соответственно.

В случае, когда парабола проходит через точку начала координат, $x_1 = 0; y_1 = 0; x_2 = a_1; y_2 = \varepsilon_1; x_3 = a_2; y_3 = \varepsilon_2$.

В ходе математических преобразований получаем результирующее соотношение для случая $a \rightarrow 0$:

$$\sigma(0) = \frac{4Eh^2}{3l^2} \frac{d\varepsilon}{da}(0) \Rightarrow \sigma(0) = \frac{4Eh^2}{3l^2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_2 a_1^2 - \varepsilon_1 a_2^2}{a_1^2 a_2 - a_1 a_2^2} \right)$$

Данная формула справедлива лишь в том случае, когда участок деформирующегося стержня длиной l целиком расположен в зоне постоянных по длине остаточных напряжений.

Далее необходимо определить толщину снятого слоя в процессе травления. Допуская равномерность травления по времени и поверхности образца при электрохимическом травлении, толщина i -го снятого слоя определяется через время и ток поляризации по закону Фарадея:

$$a_i = \frac{\alpha \cdot \eta \cdot I_{\text{п}} \cdot T_i}{\gamma \cdot b \cdot l_0}$$

где α – электрохимический эквивалент, η – коэффициент выхода по току, $I_{\text{п}}$ – анодный ток поляризации, T_i – время травления, γ – удельная плотность материала, b – ширина образца, l_0 – длина поверхности травления.

Программное обеспечение в автоматизированном режиме строит эпюру аппроксимированных значений остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя образца. Полученные числовые значения представлены в таблице 1.

Эпюра значений остаточных напряжений позволяет судить о глубине упрочнённого слоя и средней величине остаточных напряжений в пределах упрочнённого слоя.

Таблица 1 – Полученные числовые значения эксперимента

№ п.	$\sigma_{\text{ост}}, \text{МПа}$	$a_i, \text{мм}$	$f, \text{мм}$
1	-279,1	0,000	0,0
2	-284,5	0,005	-3,0
3	-294,5	0,010	-9,0
4	-305,9	0,020	-29,0
5	-317,1	0,030	-57,0
6	-327,6	0,040	-88,0
7	-337,1	0,050	-125,0
8	-345,3	0,060	-160,0
9	-351,9	0,070	-190,0
10	-356,8	0,080	-236,0
11	-359,9	0,090	-279,5
12	-361,0	0,100	-325,0
13	-360,2	0,110	-369,0
14	-357,5	0,120	-419,0
15	-352,8	0,130	-466,5
16	-346,3	0,140	-517,5
17	-338,0	0,150	-566,0
18	-328,0	0,160	-616,0
19	-316,4	0,170	-667,0
20	-303,4	0,180	-717,0
21	-289,2	0,190	-767,0
22	-273,8	0,200	-817,0
23	-257,4	0,210	-865,0
24	-240,3	0,220	-914,0
25	-222,6	0,230	-961,5
26	-204,4	0,240	-1006,5
27	-186,0	0,250	-1051,5
28	-167,4	0,260	-1092,5
29	-148,9	0,270	-1141,0
30	-130,6	0,280	-1175,0
31	-112,6	0,290	-1208,5
32	-95,1	0,300	-1240,0
33	-78,2	0,310	-1269,0
34	-62,0	0,320	-1295,0
35	-46,6	0,330	-1319,0

Измерение остаточных напряжений после виброударного упрочнения образцов

36	-32,1	0,340	-1341,0
37	-18,6	0,350	-1359,0
38	-6,1	0,360	-1375,0
39	5,4	0,370	-1389,0
40	15,8	0,380	-1401,1

Полученные данные позволяют построить эпюру остаточных напряжений. При этом глубина упрочнённого слоя a_n определяется точкой пересечения значения $\sigma_{ост} = 0$, на эпюре остаточных напряжений (Рисунок 1).

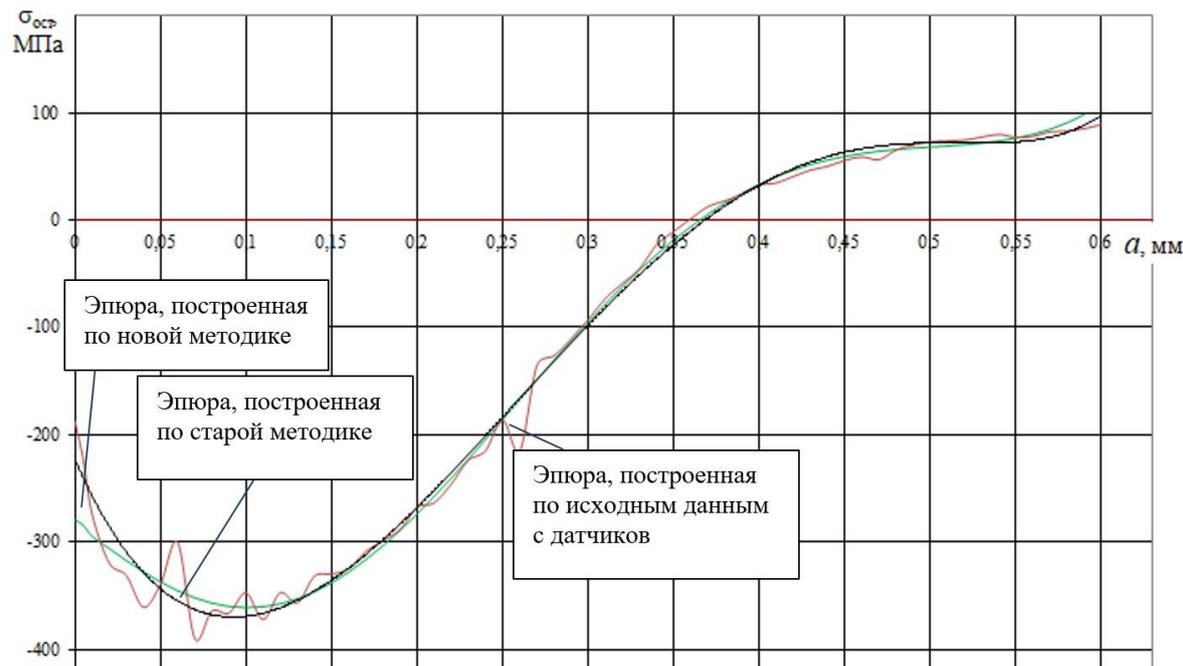


Рисунок 1 – Эпюра остаточных напряжений

Нормируемые величины для образцов из сплава Д16-Т: глубина упрочнённого слоя a_n и аппроксимированная величина остаточных напряжений $\sigma_{ср}$, определенной для интервала от 0...0,40 мм, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Нормированная величина остаточных напряжений

Наименование нормируемой величины	Допустимая величина
Глубина упрочнённого слоя a_n , мм	
- наружная поверхность	$\geq 0,35$
- внутренняя поверхность	$\geq 0,30$
Среднее напряжение $\sigma_{ср}$, кгс/мм ²	$\leq -12,0$

Значения нормируемых величин для образцов из других сплавов определяются в соответствии с техническими требованиями. В случае отклонения указанных величин от предписанных значений или при выпадении значения величины остаточных напряжений за границы доверительного интервала, ответственные специалисты предприятия должны провести повторное исследование не менее двух образцов из запасных отсеков-дублёров.

Заключение и выводы

Проведены исследования образцов, вырезанных из лонжерона после виброударного упрочнения из сплава Д16-Т. Получены результирующие значения напряжений, а также глубины упрочнения поверхностного слоя.

Проанализировав рисунок 1 заметим, что эпюра, построенная по новой методике, более сглажена и приближена к результатам с датчиков при эксперименте. Все это позволяет сде-

лать вывод о том, что изменение математического алгоритма и порядка аппроксимации исходных данных благотворно влияют на результаты исследования.

В данном эксперименте глубина упрочненного слоя была определена как $a_n = 0,44271$ мм.

Стоит отметить, что вопросы анализа остаточных напряжений и глубины наклепа поверхностного слоя материала на данный момент являются очень актуальными для промышленности.

Литература

1. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – Москва : Машгиз, 1963. – 232 с. – Текст : непосредственный.
2. Давиденков, Н. Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений / Н. Давиденков. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. – 1959. – № 3. – С. 318–319.
3. Буркин, С. П. / Остаточные напряжения в металлопродукции / С. П. Буркин, Г. В. Шимов., Е. А. Андрюкова. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2015. – 239 с. – Текст : непосредственный.
4. Jaramillo S, H. E. Effect of the shot peening process on the fatigue strength of SAE 5160 steel / H. E. Jaramillo S, N. A. de Sánchez, J. A. Avila D // The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2018. – Vol. 203-210. – P. 1–8.
5. Segurado, E. Effects of low intensity shot peening treatments applied with different types of shots on the fatigue performance of a high-strength steel / E. Segurado, F. J. Belzunce, I. F. Pariente // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 340. – P. 25–35.
6. Конечно-элементное моделирование поверхностного слоя деталей, подвергаемых упрочнению методами поверхностного пластического деформирования / В. А. Кирпичёв, А. С. Букатый, В. К. Шадрин, Н. И. Яковенко. – Текст : непосредственный // Математическое моделирование и краевые задачи: МЗЗ 4.1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара : СамГТУ, 2009. – С. 121–122.
7. Исследование степени наклёпа и сопротивления усталости сплава ЭИ 968 после упрочнения стеклянными и стальными микрошариками / В. А. Кирпичёв, А. А. Иванов, А. С. Букатый, О. Ю. Семёнова. – Текст : непосредственный // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» : в 2 частях. – Самара : СГАУ, 2009. – Ч. 2. – С. 180–181.
8. Букатый, С. А. Автоматизированный прибор для определения остаточных напряжений / С. А. Букатый, А. С. Букатый. – Текст : непосредственный // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Инновация-2008». – Ташкент, 2008. – С. 275–276.
9. Макаров, В. Ф. Применение методов ППД при обработке деталей ГТД. / В. Ф. Макаров, А. С. Горбунов. – Текст : непосредственный // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Научные технологии в машиностроении» (Ишимбай, 10-12 июня 2012 г.). – Ишимбай, 2012. – С. 12–13.
10. Лабутин, А. Ю. Исследование изменения шероховатости поверхности лопаток авиадвигателей в ходе её модификации при пневмогидроструйной обработке в среде жидкости / А. Ю. Лабутин, А. В. Тюрин. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов АКТО – 2014.
11. Патент № 2211755 Российская Федерация, МПК В24С 5/04 (2006.01). Эжектор для пневмогидроструйной обработки деталей : № 2001103947/02 : заявл. 12.02.2001 : опубл. 10.09.2003 / А. Ю. Лабутин, Ю. П. Лабутин. – 7 с. – Текст : непосредственный.
12. Патент № 2068333 Российская Федерация, МПК В24С 3/10 (2006.01) Устройство для упрочнения контрольных пластин. : № 93025875/08 : заявл. 30.04.1993 : опубл. 27.10.1996 / Ю. П. Лабутин, Р. М. Халимулин, В. И. Горинов, А. Ю. Лабутин. – 5 с. – Текст : непосредственный.