

УДК 621.787.6: 303.724.32.039.3

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Радченко С.Г., Лапач С.Н.

КПИ им. Игоря Сикорского, г.Киев, Украина

Аннотация. Пневмодробеструйное упрочнение деталей в настоящее время широко используется в различных областях техники. Но оптимальный подбор параметров этого процесса (размер и материал дробы, давление воздуха и пр.) необходимо подбирать в каждом конкретном случае экспериментально по результатам полученных показателей прочности детали. В работе рассматривается способ получения экспериментальной информации о таком процессе с использованием планирования экспериментов и регрессионного анализа. Исследовались характеристики качества технологического процесса упрочнения у – число тысяч циклов нагружения образцов до образования трещин в зависимости от таких факторов как давление воздуха, диаметр шариков, толщина материала, материал шариков). Получена информативная, устойчивая регрессионная модель, позволяющая исследовать и оптимизировать процесс упрочнения.

Ключевые слова: упрочнение авиационных деталей, пневмодробеструйное упрочнение, планирование эксперимента, регрессионный анализ.

Пневмодробеструйное упрочнение деталей в настоящее время широко используется в различных областях техники [1–4]. Вместе с тем выбор условий этого упрочнения не является тривиальной задачей: «оптимальная продолжительность наклепа, так же как и другие параметры режима дробеструйной обработки, в каждом конкретном случае устанавливается экспериментально по результатам испытания упрочненных дробью деталей» [5]. Для получения информации по результатам экспериментальных исследований наилучшим образом подходят специально разработанный технологии построения моделей с использованием методов планирования эксперимента и регрессионного анализа [6, 7].

В данной работе исследовались характеристика качества технологического процесса упрочнения деталей типа обшивок из алюминиевого сплава Д16АТВ у – число тысяч циклов нагружения образцов до образования трещин, $N_T \cdot 10^{-3}$, в зависимости от влияющих факторов

X_1 – давление воздуха, P , кгс/см², уровни: 2, 3, 4;

X_2 – диаметр шариков, D , мм, уровни: 2, 3, 4;

X_3 – толщина материала, t , мм, уровни: 1,2; 2,0; 4,0;

X_4 – материал шариков, M , уровни: 0 (сталь ШХ15), 1 (стекло), 2 (алюминиевый сплав В95Т1).

В данном исследовании для получения многофакторной статистической модели \hat{y} был использован робастный многофакторный регулярный план эксперимента $3^4/27$: 4 фактора на 3 уровнях, 27 опытов. При проведении эксперимента каждый опыт повторялся 5 раз.

Предварительный статистический анализ результатов эксперимента подтвердил однородность дисперсий экспериментов. Вместе с тем, уровень рассеивания от случайных факторов статистически сравним с уровнем рассеивания от независимых управляемых факторов эксперимента. Это может означать, что существуют некоторые значимые факторы, влияющие на исследуемый процесс, которые не были ни включены в план

експеримента, ні зафіксовані при його проведенні. Этот факт должен быть учтён при дальнейших исследованиях.

С использованием ПС ПРИАМ (планирование, регрессия и анализ моделей) [8] была построена модель

$$\hat{y} = 95,163 - 29,9764z_3 + 14,6747x_2z_3x_4 - 10,1019x_3 - 13,4026z_3x_2z_3 + 5,8x_2,$$

где:

$$x_1 = X_1 - 3; z_1 = 1,5(x_1^2 - 0,666667);$$

$$x_2 = X_2 - 3;$$

$$x_3 = 0,625(X_3 - 2,5); z_3 = 2,54694(x_3^2 - 0,346154x_3 - 0,541667);$$

$$x_4 = X_4 - 1.$$

Модель имеет хорошую информативность, идеальные показатели структурной (матрица полностью ортогональна) и вычислительной устойчивости (число обусловленности $\text{cond} = 1$), объясняет более 90% общего рассеивания и имеет удовлетворительные описывающие свойства (средняя погрешность аппроксимации 7,6%). Детально статистические показатели модели приведены в табл. 1. Формально статистическая неадекватность модели вызвана высоким уровнем влияния случайных факторов (см. выше), что приводит к тому, что остаточная дисперсия оказывается относительно слишком маленькой. Вместе с тем, с точки зрения постановки задачи, модель адекватно описывает исследуемый процесс при достаточной точности, надежности и устойчивости.

Анализ структуры модели показывает, что основное влияние на показатель трещиностойкости оказывает толщина материала (74% общего рассеивания) и диаметр шариков (3,1%). Остальные факторы во взаимодействии с толщиной и диаметром объясняют 12,9% рассеивания. Таким образом, упрочняющий эффект данного процесса определяет трещиностойкость примерно на уровне 20% от эффекта, обеспечиваемого свойствами самого материала. Обращаем внимание, что зависимость трещиностойкости от толщины нелинейная.

Таблица 1.

Статистические характеристики модели

Параметры статистического анализа		Условные обозначения	Значения параметров \hat{y}
Проверка гипотезы о воспроизводимости результатов эксперимента	Дисперсия воспроизводимости	$s_{\text{восп}}^2$	597,15
	Среднеквадратичное отклонение	$s_{\text{восп}}$	24,44
	Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости	$f_{\text{восп}1}$	27
		$f_{\text{восп}2}$	4
	Экспериментальное значение G -критерия	$G_{\text{эксп}}$	0,1363
	Критическое значение G -критерия	$G_{\text{крит}}$	0,1503
Уровень значимости	α	0,05	
Проверка гипотезы об адекватности модели	Дисперсия адекватности	$s_{\text{ад}}^2$	91,90
	Экспериментальное значение F -критерия	$F_{\text{эксп}}$	6,498
	Критическое значение F -критерия	$F_{\text{крит}}$	1,872
	Число степеней свободы для адекватности	$f_{\text{ад}1}$	5
		$f_{\text{ад}2}$	21

	Уровень значимости	α	0,05
	Адекватность модели	Не адекватна	
Анализ полученной модели на информативность	Коэффициент множественной корреляции	R	0,949
	Число степеней свободы для коэффициентов модели	f_k	5
	Число степеней свободы для остаточной суммы квадратов	$f_{остR}$	129
	Экспериментальное значение F -критерия	$F^{эксп}$	38,068
	Критическое значение F -критерия	$F^{крит}$	2,284
	Уровень значимости	α	0,05
	Критерий Бокса и Веца	γ	3
	Информативность модели	хорошая	
Число обусловленности		$cond(X^T X)$	1
Среднее абсолютных величин относительных погрешностей аппроксимации, %		$ \bar{e}_{\text{отп}} $	7,19
Среднее абсолютных величин абсолютных погрешностей аппроксимации		$ \bar{e}_u $	7,61
Доля рассеяния, объясняемая моделью		Q_j	90,06

Из анализа рис.1 следует, что увеличение диаметра шариков в пределах проведенного эксперимента приводит к росту трещиностойкости (увеличению числа циклов нагрузки до появления трещин). Зависимость же этого показателя от толщины материала нелинейная: стойкость увеличивается до толщины $t = 2$, а затем уменьшается. Скорость изменения трещиностойкости в зависимости от толщины материала увеличивается при росте диаметра шариков.

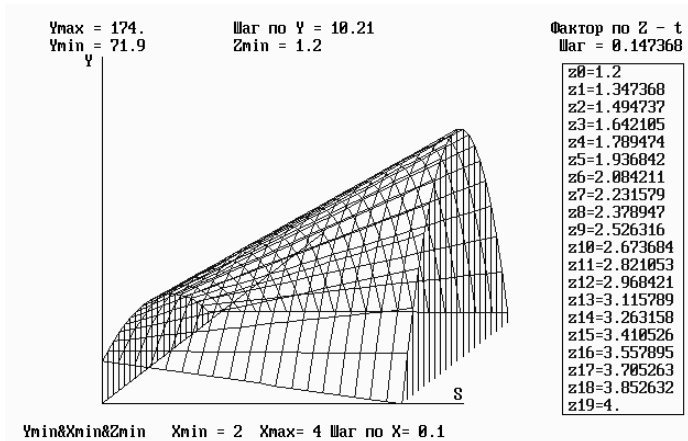


Рис. 1. Зависимость отклика от толщины материала (t) и диаметра шариков (S) (при $V = 2.0$ и материал шариков сталь ШХ 15)

Выводы.

1. Для описания процесса упрочнения авиационных деталей была построена регрессионная модель, обладающая свойствами, делающими её пригодной для анализа происходящих при исследуемом процессе явлений и оптимизацию технологического процесса.
2. Анализ результатов эксперимента показывает наличие других факторов, существенно влияющих на процесс, что требует дополнительных исследований.
3. Исследование структуры модели показывает сложность исследуемого процесса, для описания которого понадобились тройные взаимодействия высокого порядка.

Дослідження і математичне моделювання процесу зміцнення авіаційних деталей**Радченко С.Г., Лапач С.М.**

***Анотація.** Пневмодробоструминне зміцнення деталей в даний час широко використовується в різних областях техніки. Але оптимальний підбір параметрів цього процесу (розмір і матеріал дробу, тиск повітря і ін.) необхідно підбирати в кожному конкретному випадку експериментально за результатами отриманих показників міцності деталі. У роботі розглядається спосіб отримання експериментальної інформації про такий процес з використанням планування експериментів і регресійного аналізу. Досліджувалися характеристика якості технологічного процесу зміцнення у - число тисяч циклів навантаження зразків до утворення тріщин, в залежності від таких факторів як тиск повітря, діаметр кульок, товщина матеріалу, матеріал кульок. Отримано інформативна, стійка регресійна модель, що дозволяє досліджувати і оптимізувати процес зміцнення.*

***Ключові слова:** зміцнення авіаційних деталей, пневмодробоструминне зміцнення, планування експерименту, регресійний аналіз.*

RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELING OF PROCESS**Radchenko S.G., Lapach S.M.**

***Annotation.** Pneumatic blasting hardening of parts is currently widely used in various fields of technology. But the optimal selection of the parameters of this process (size and material of the fraction, air pressure, etc.) must be chosen experimentally in each particular case from the results of the obtained strength indices of the part. The paper considers the process of obtaining experimental information about such a process using planning experiments and regression analysis. The characteristics of the quality of the hardening process were investigated — the number of thousands of sample loading cycles before cracking, depending on such factors as air pressure, diameter of balls, material thickness, material of balls. An informative, stable regression model was obtained, which allows to investigate and optimize the hardening process.*

***Keywords:** hardening of aircraft parts, pneumatic blasting hardening, experiment planning, regression analysis.*

Список литературы

1. <https://mash-xxl.info/info/704140/>
2. <https://novatecs.ru/articles/2087-drobestruynoe-uprochnenie-metalla/>
3. <http://irops.ru/drobestruynoe-uprochnenie>
4. https://www.gidroabraziv.com/katalog_produktsii/gidrodrobestruynaya_obrabotka_uprochnenie_poverhno_sti
5. <https://www.wheelabratorgroup.com/ru-ru/my-application/application-by-process/what-is-shot-blasting>
6. С.Н. Лапач, А.В. Чубенко, П.Н. Бабич Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel –К.: 2000, Морюн. – 320с.
7. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа – К.: «Корнійчук», 2011. – 376 с.
8. Лапач С.Н., Радченко С.Г., Бабич П.Н. Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ) / Каталог программные продукты Украины. К.: 1993. С. 24-27.