

ПРОГРОЗУВАННЯ ВИТРИВАЛОСТІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД В ДОСЛІДНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В умовах швидкопереналагоджуваного виробництва, яким є дослідне виробництво, необхідно за мінімальний термін отримати виріб, який відповідав би всім вимогам щодо точності виготовлення, продуктивності, довговічності, надійності. Одним із сучасних та ефективних методів отримання лопаток компресорів у дослідному виробництві служить технологія, що включає високошвидкісне фрезерування (ВШФ) та фінішну обробку [1]. Застосування цієї технології викликає необхідність дослідження впливу низки факторів, що визначають якісні характеристики лопаток, таких як межа витривалості, шорсткість, глибина та ступінь наклепу, залишкові напруги та деякі інші.

На основі рівнянь лінійної множинної регресії розглянемо визначення залежності межі витривалості σ_{-1} лопаток, виготовлених поєднанням ВШФ з подальшою оздоблювально-зміцнювальною обробкою, від параметрів якості їх поверхневого шару. Регресійно-кореляційний аналіз зводиться до встановлення рівняння регресії (моделі), тобто виду залежності між випадковими величинами, аргументами x та функцією y , оцінка тісноти зв'язку між ними, достовірності та адекватності результатів.

Критерієм близькості кореляційної залежності між x та y є коефіцієнт парної кореляції R^2 .

Перевірку емпіричної залежності виконували на: відтворюваність за критерієм Кохрена; адекватність (для малої вибірки) за критерієм Фішера; значимість за критерієм Стьюдента.

Знаходження рівнянь лінійної множинної регресії, коефіцієнтів регресії, а також перевірка моделі на відтворюваність, адекватність та значимість проводилося з використанням програми STATISTICA.

Вихідні дані отримання залежності представлені в табл. 1, а парні коефіцієнти кореляції – у табл. 2.

Таблиця 1 – Вихідні дані для отримання моделі межі витривалості лопаток

$\sigma_{-1\text{вих.}}$, МПа	R_a , мкм	h_s , мкм	S , %	σ_{max} , МПа	h_σ , мкм	$h_{\text{стаб.}}$, мкм
540,5	0,224	18,8	26,6	307	2	45
540,5	0,295	18,8	26,6	307	2	50
540,5	0,248	29,5	26	392	2	65
540,5	0,318	29,5	26	392	2	70
571,5	0,299	39,7	39,6	292	18	88
571,5	0,396	39,7	39,6	292	22	90
504	0,309	27,5	23,7	470	10	78
504	0,392	27,5	23,7	470	20	80

Примітка. $\sigma_{-1\text{вих.}}$ – межа витривалості лопаток, МПа; R_a – шорсткість поверхні, мкм; h_s – глибина наклепу, мкм; S – ступінь наклепу, %; σ_{max} – максимальна стискаюча напруга, МПа; h_σ – глибина залягання максимальної напруги, мкм; $h_{\text{стаб.}}$ – глибина стабілізації напруг, мкм.

Таблиця 2 – Парні коефіцієнти кореляції

Параметр	$\sigma_{-1\text{вих.}}$, МПа	R_a , мкм	h_s , мкм	S , %	σ_{max} , МПа	h_σ , мкм	$h_{\text{стаб.}}$, мкм
$\sigma_{-1\text{вих.}}$, МПа	1,00	-0,06	0,54	0,88	-0,89	0,16	0,18
R_a , мкм	-0,06	1,00	0,50	0,27	0,23	0,79	0,72
h_s , мкм	0,54	0,50	1,00	0,78	-0,16	0,71	0,91
S , %	0,88	0,27	0,78	1,00	-0,71	0,59	0,56
σ_{max} , МПа	-0,89	0,23	-0,16	-0,71	1,00	0,02	0,18
h_σ , мкм	0,16	0,79	0,71	0,59	0,02	1,00	0,85
$h_{\text{стаб.}}$, мкм	0,18	0,72	0,91	0,56	0,18	0,85	1,00

Попередні розрахунки показали не значущість параметрів h_s , h_σ , $h_{\text{стаб.}}$, отже, складаємо матрицю, включаючи дані значення (табл. 3), за якою розраховуємо коефіцієнти регресії (табл. 4).

Таблиця 3 – Матриця скоригованих вихідних даних та вихідних параметрів

$\sigma_{-1\text{вих.}}$, МПа	R_a , мкм	S , %	σ_{max} , МПа	$\sigma_{-1\text{вих.}}$, МПа	$S_{\sigma_{-1\text{вих.}}}$, МПа
540,5	0,224	26,6	307	546,587	6,087
540,5	0,295	26,6	307	543,003	2,503
540,5	0,248	26	392	531,537	8,962
540,5	0,318	26	392	528,004	12,496
571,5	0,299	39,6	292	574,717	3,217
571,5	0,396	39,6	292	569,821	1,679
504	0,309	23,7	470	511,761	7,761
504	0,392	23,7	470	507,571	3,571
4313	2,481	231,8	2922		

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії

Параметр	Вільний коефіцієнт	R _a , мкм	S, %	σ _{max} , МПа
Коефіцієнт регресії	542,118	-50,475	2,286	-0,147
Розсіювання коефіцієнта регресії	45,949	29,602	1,008	0,087

На основі прийнятих вихідних даних отримана емпірична залежність впливу параметрів якості поверхневого шару на межу витривалості σ₋₁ лопаток, отриманих ВШФ з подальшим поліруванням та ультразвуковим зміцненням:

$$\sigma_{-1} = 542 - 50,475 R_a + 2,286 S - 0,147 \sigma_{max}.$$

Нормуємо матрицю та наведемо коефіцієнти регресії до загальної системи виміру, тобто. розділимо кожне значення на середнє за показником та отримаємо нову матрицю.

Таблиця 5 – Матриця нормованих вихідних даних

σ _{-вих.} , МПа	R _a , мкм	S, %	σ _{max} , МПа
0,1253	0,0903	0,1148	0,1051
0,1253	0,1189	0,1148	0,1051
0,1253	0,0999	0,1122	0,1342
0,1253	0,1282	0,1122	0,1342
0,1325	0,1205	0,1708	0,0999
0,1325	0,1596	0,1708	0,0999
0,1169	0,1245	0,1023	0,1608
0,1169	0,1580	0,1023	0,1608

Розрахувавши матрицю, отримуємо емпіричну залежність, у якій коефіцієнти регресії показують значущість кожного з них:

$$\sigma_{-1} = 0,125 - 0,029R_a + 0,123S - 0,098\sigma_{max}.$$

З цієї залежності випливає, що найбільший вплив на межу витривалості лопаток, отриманих поєднанням ВШФ і оздоблювально-зміцнювальної обробки, надають параметри S і σ_{max}.

Перевірку емпіричної залежності проводили за даними експериментів, не включених до початкових розрахунків (табл. 6).

Для оцінки помилки, що допускається при описі істинної залежності σ₋₁ за допомогою знайденого рівняння регресії за відсутності повторних дослідів та дисперсії відтворюваності, складемо F співвідношення (F_p) між дисперсією щодо \bar{y} (S_y²) та залишковою дисперсією S_{зал.}².

Таблиця 6 – Матриця даних для перевірки залежності

σ _{-вих.} , МПа	R _a , мкм	S, %	σ _{max} , МПа	σ _{-вих.} , МПа	S _{зал.} ²	S _y ²
541	0,259	26,6	300	545,566	20,85082	44,10281
545	0,283	25	388	527,797	295,9298	123,8298
571	0,347	39,6	290	572,232	1,517602	1109,332
504	0,351	23,7	465	510,106	37,2775	830,5777
				538,925	355,5757	2107,842

З розрахунків отримано: F_p=5,928; R²=0,8313; R=0,9118.

Знайдене лінійне рівняння регресії з більшою ймовірністю 0,95 адекватно визначає реальну залежність, тому що значення співвідношення F_p більше значення квантилю розподілу Фішера при α=0,05 та степенях свободи f₁=N-1 і f₂=N-L (F_{табл.}=2,644). Точність опису (коефіцієнт кореляції R²) реальної залежності знайденим лінійним рівнянням регресії становить 95%.

Похибка моделі становить до 5%.

Таким чином, отримані емпіричні залежності встановлюють зв'язок основних параметрів якості поверхневого шару з величиною витривалості межі лопаток. Дані залежності дозволяють цілеспрямовано формувати межу витривалості лопаток компресорів ГТД, прогножуючи ресурс їхньої роботи [2].

Література:

- Сахнюк Н.В., Іщенко Л.Й. Управління якістю поверхні лопаток ГТД технологічними методами // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2011. вип. № 28. С. 264-268.
- Сахнюк Н.В. Технологічне забезпечення якості лопаток компресорів в дослідному виробництві: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.08. Харків, 2008. 21 с.