

УДК 539.4

Майборода В. С., Налимов Ю. С., Теслюк Н. Н., Майданюк С. В., Пливак А. А.

МИКРОГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.

Актуальность работы и состояние проблемы исследования. В научно-технической литературе имеется большое количество информации о том, что при повторно-переменном нагружении процесс усталостного разрушения связан с изменениями тонкой структуры материала. Установлено, что этот процесс происходит в результате формирования микротрещин в зонах локального сосредоточения микроповреждений происходящих в результате упрочнения-разупрочнения отдельных локальных микрообъемов материала, расположенных в наиболее нагруженных участках изделий, которые находятся, как правило, вблизи или на поверхности. Формирование подобных локальных зон, в которых идут необратимые изменения субструктуры материала происходит на стадии инкубационного периода усталости [1] и должны сопровождаться определенными внешними проявлениями, связанными с изменениями микрогеометрии поверхности испытываемых деталей. Подобные изменения возможны в результате массового выхода дислокаций в локальных зонах на поверхность материала, коагуляции вакансий в поверхностных зонах, миграции легирующих элементов в результате действия повторно-переменных нагрузок и, как результат, проявлению эффектов экструзии и интрузии [2, 3].

Целью работы является исследование особенностей изменения микрогеометрии рабочих поверхностей образцов, изготовленных из высоколегированного никелевого сплава, в процессе испытаний на усталость в условиях консольного изгиба.

Материалы и методика проведения исследований.

Для проведения указанных исследований использованы образцы с круглым поперечным сечением (рис. 1) изготовленные из жаропрочного никелевого сплава ЧС-70 путем литья заготовок и дальнейшей механической обработки.



Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Испытания на усталость проводили по схеме консольного изгиба (рис. 2) на установке, собранной на основе электродинамического вибратора по методике, описанной в [1].

На первом этапе определяли плоскость колебаний образца, в которой в последующем проводили испытания и измерения микропрофиля поверхности. Испытания образцов выполняли поэтапно при разных величинах знакопеременной нагрузки с симметричным циклом (табл. 1.). После каждого этапа выполняли контроль микропрофиля рабочих поверхностей образца. Контроль шероховатости рабочей поверхности проводили в 6 сечениях в зонах, в которых действовали максимальные напряжения (рис. 3). Запись микропрофиля поверхности в указанных сечениях выполняли на усовершенствованном профилографе на базе Калибр 250 с возможностью записи в цифровом виде.

Таблица 1

Напряжения испытаний и поэтапное число циклов нагружения образцов из сплава ЧС-70.

№ образца	σ_a , МПа	Число циклов нагружения, N цикл.					Результат испытаний
		Этапы нагружения					
		1	2	3	4	5	
22	480	10^5	$1,2 \cdot 10^5$				Образец разрушился
28	480	10^5	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^5$		Образец разрушился
27	430	10^5	$2 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	Образец разрушился
25	430	10^5	$2 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$10^7 \rightarrow$	Образец не разрушился
24	380	10^5	$2 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^6$		Образец разрушился
26	380	10^5	$2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$			Образец разрушился



Рис. 2. Схема нагружения образца при испытаниях на усталость

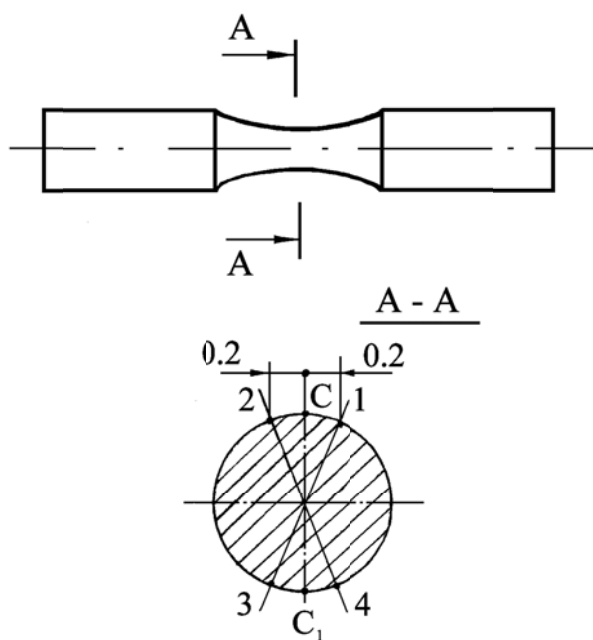
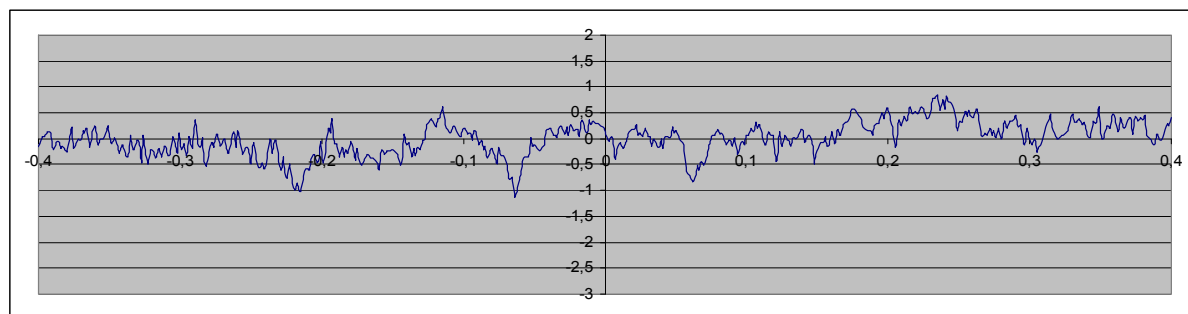


Рис. 3. Сечения рабочей части образца, в которых контролировали состояние микропрофиля поверхности: 1; C; 2; 3; C₁; 4 – зоны измерения

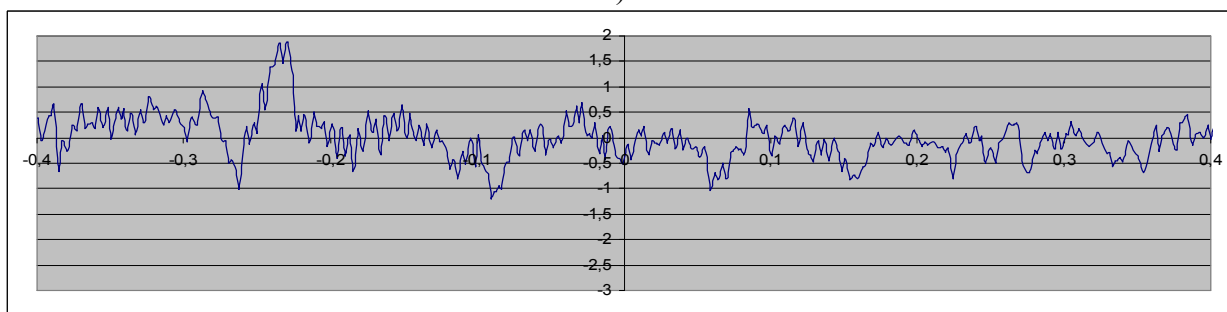
У исследуемых экспериментальных образцов отсутствует участок с прямолинейной цилиндрической образующей, поэтому в конструкции измерительного блока использовали специально разработанный удлиненный мерительный щуп и «фиктивную» опорную поверхность, которую при каждом измерении базировали параллельно продольной оси образца с точностью не менее 0,1 мкм. После записи характеристик микропрофиля образцов выполняли обработку полученных результатов по программе, обеспечивающей фильтрацию сигнала от внешних шумов, выравнивание микропрофиля и расчет параметров шероховатости, которые приведены в ГОСТ 25142-82.

На рис. 4 представлен характерный вид профилограмм поверхности образца № 28 в рабочем сечении на разных этапах циклического нагружения.

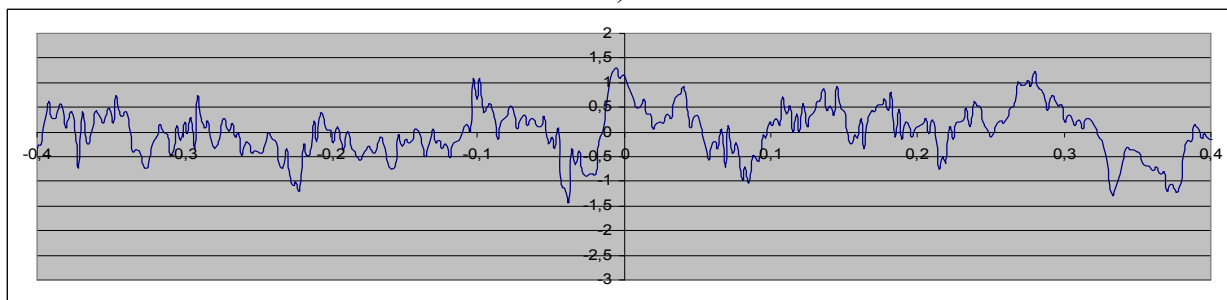
Рассчитывали следующие параметры шероховатости: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; t_p – относительная опорная длина профиля.



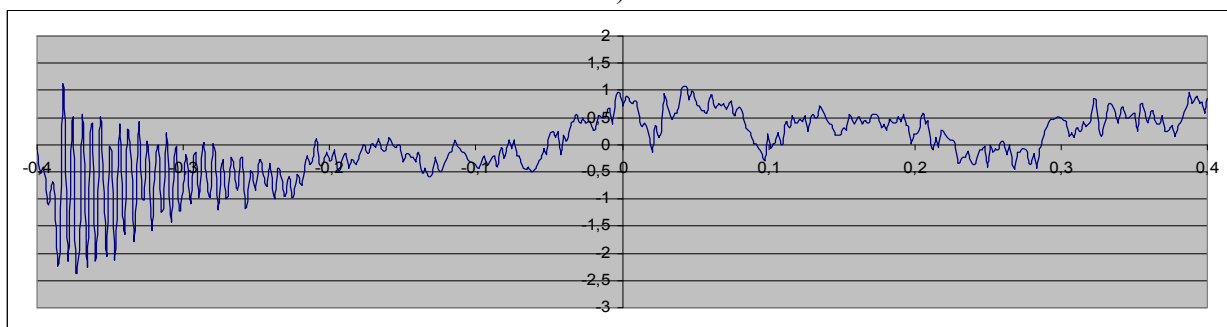
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Профилограммы поверхности образца № 28 в сечении зарождения и появления трещины усталости после N циклов нагружения при $\sigma_a = 480$ МПа:

а) 10^5 , б) $2 \cdot 10^5$, в) $3 \cdot 10^5$, г) $8,1 \cdot 10^5$. По оси абсцисс – координата вдоль оси образца, мм; по оси ординат - высота микронеровностей профиля, мкм

Так как в процессе испытаний на усталость все образцы были доведены до разрушения (появления трещины усталости), то из всего массива данных измерений шероховатости были использованы только те, которые относились к зоне рабочей части образца, где произошло разрушение.

В табл. 2 приведены расчетные характеристики шероховатости поверхности образцов при поэтапном циклическом нагружении.

Таблица 2

Характеристики шероховатости поверхности образцов при поэтапном циклическом нагружении

№ образца*	σ_a , МПа	Параметры шероховатости, мкм	Этапы нагружения					
			Исходный	1	2	3	4	5
28-3	480	R_a <i>cp</i>	0,336	0,212	0,251	0,164	0,168	
		R_z <i>cp</i>	1,923	1,095	1,208	0,835	0,849	
		R_{max} <i>cp</i>	2,917	1,604	1,665	1,049	1,135	
22-2	480	R_a <i>cp</i>	0,363	0,341	0,313			
		R_z <i>cp</i>	1,829	1,937	1,621			
		R_{max} <i>cp</i>	2,489	2,522	2,522			
27-С	430	R_a <i>cp</i>	0,188	0,239	0,229	0,147	0,168	0,146
		R_z <i>cp</i>	0,832	0,266	1,265	0,711	0,789	0,753
		R_{max} <i>cp</i>	1,333	1,264	1,615	0,987	1,102	1,106
25-С	430	R_a <i>cp</i>	0,157	0,215	0,477	0,127	0,221	0,116
		R_z <i>cp</i>	0,809	1,056	3,108	0,774	1,057	0,547
		R_{max} <i>cp</i>	1,103	1,530	3,609	0,995	1,481	0,784
24-3	380	R_a <i>cp</i>	0,301	0,207	0,255	0,150	0,142	
		R_z <i>cp</i>	1,479	1,102	1,327	0,701	0,695	
		R_{max} <i>cp</i>	1,991	1,547	1,809	1,070	1,036	
26-3	380	R_a <i>cp</i>	0,241	0,497	0,312	0,177		
		R_z <i>cp</i>	1,069	3,051	2,037	0,789		
		R_{max} <i>cp</i>	1,617	4,554	3,122	1,357		

Примечание: *Рядом с номером образца указаны зоны на рабочей части образцов, к которым относятся приведенные величины.

На рис. 5 представлены зависимости изменения параметров шероховатости R_a , R_z и R_{max} после поэтапного циклического нагружения образцов.

Анализ данных таблицы 2 и зависимостей представленных на рис. 5 показывают, что при циклическом нагружении образцов до $(1 \div 2) \cdot 10^5$ циклов практически при всех исследуемых напряжениях имеет место увеличение величин R_a , R_z и R_{max} . Дальнейшее

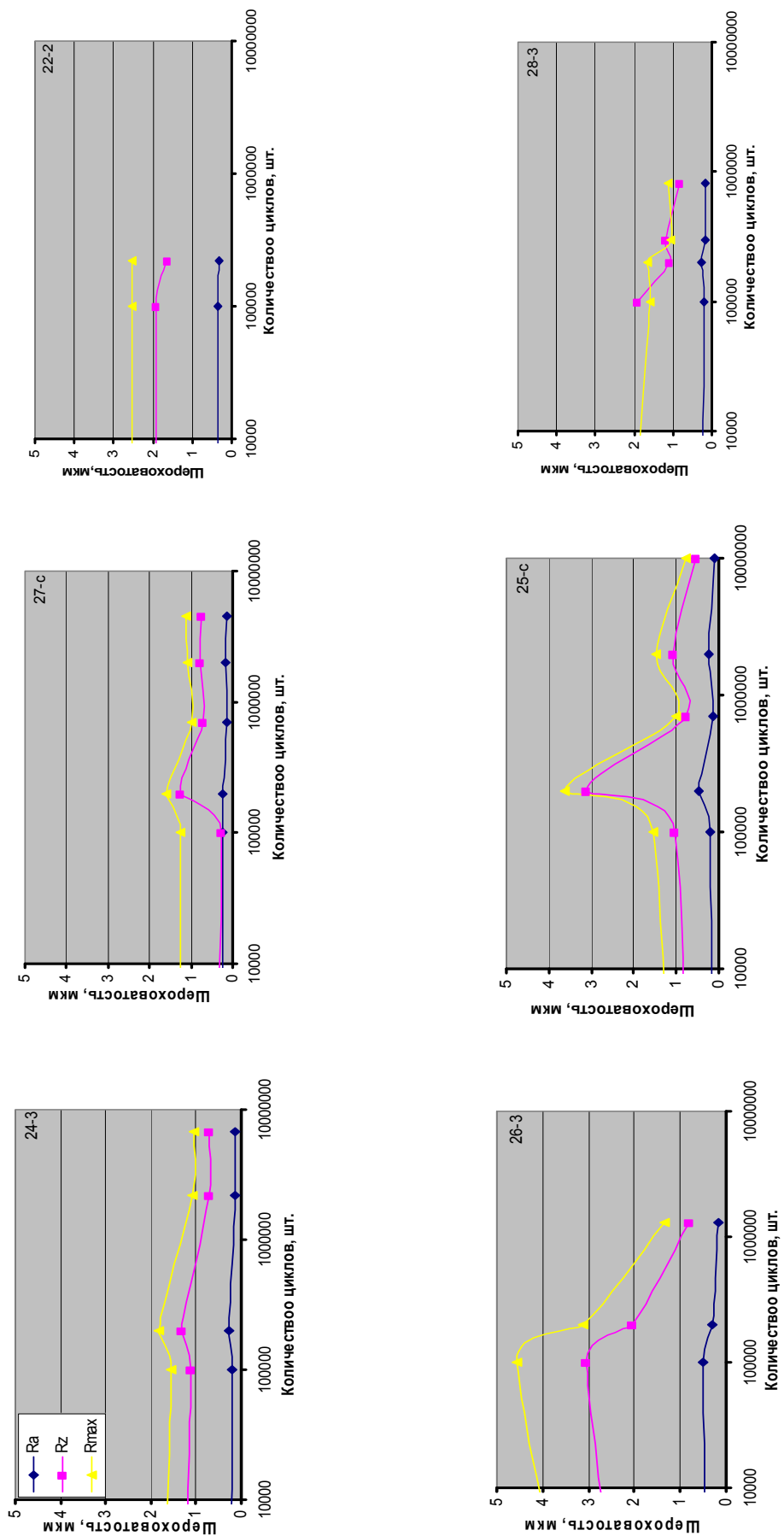


Рис. 5. Изменение параметра R_a , R_z , R_{max} от числа циклов нагружения

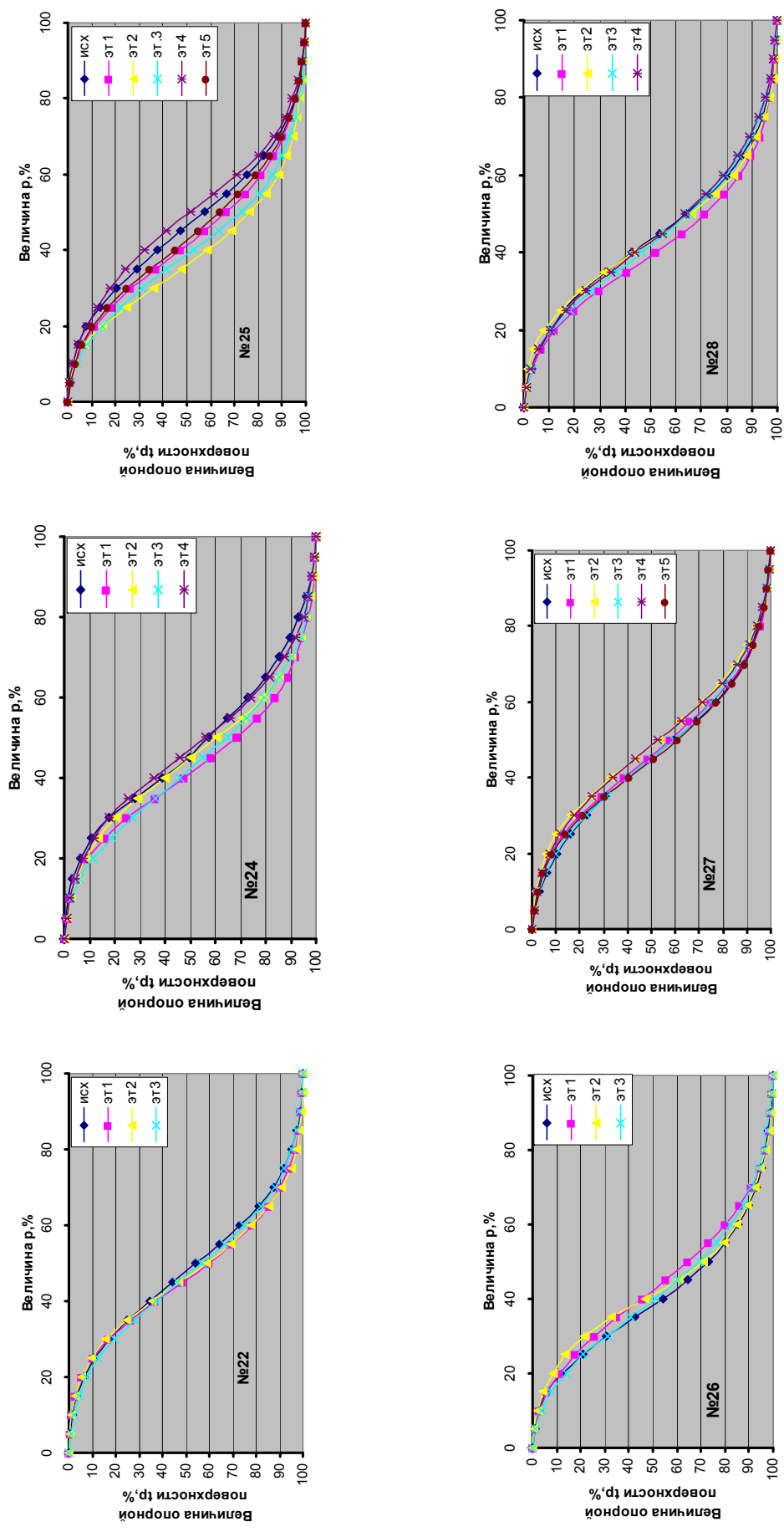


Рис.6. Изменение относительной опорной длины профиля t_r для образцов в процессе циклического нагружения

увеличение количества циклов нагружения при усталостных испытаниях приводит к снижению шероховатости (уменьшению параметров R_a , R_z и R_{max}) в контрольных сечениях поверхностей вплоть до момента разрушения.

Установленные закономерности изменения параметров шероховатости в зависимости от числа циклов нагружения позволяют предположить, что на первой стадии циклического нагружения ($N < (1 \div 2) \cdot 10^5$) плотность зародившихся во впадинах шероховатости микротрещин возрастает, достигая при долговечности $N = (1 \div 2) \cdot 10^5$ максимума, а затем на второй стадии медленно снижается.

Таким образом, кинетика изменения параметров шероховатости в зависимости от числа циклов нагружения позволяет разбить весь период циклического нагружения на стадию зарождения и развития коротких трещин (рассеянного усталостного повреждения), при котором число зародившихся трещин растет и их объединение порождает главную трещину, и стадию распространения магистральной трещины (локализованного усталостного повреждения), в течение которого зарождение новых трещин прекращается, более мелкие трещины замедляют свой рост и останавливаются, а главная трещина, развиваясь, приводит к разрушению образца.

Изменение относительной опорной длины профиля t_p для образцов в процессе циклического нагружения показаны на рис. 6.

Анализ представленных данных показывает, что параметр t_{50} (опорная длина профиля на уровне $p=50\%$) также как и параметры R_a, R_z, R_{max} на первой стадии циклического нагружения (стадии рассеянного усталостного повреждения) возрастает, а затем убывает. Приведенные данные (таблица 2) и зависимости (рис. 5 и 6) показывают, что наиболее чувствительными характеристиками шероховатости к циклическому нагружению являются параметры R_z и R_{max} .

ВЫВОДЫ

Разработана методика измерения шероховатости на криволинейной рабочей поверхности образцов с записью микропрофиля в цифровом виде. Проведенные измерения шероховатости поверхности образцов при поэтапном циклическом нагружении и рассчитанные параметры шероховатости R_a, R_z, R_{max} и t_p показали, что наиболее чувствительными характеристиками шероховатости являются параметры R_z, R_{max} и t_p . Установлено, что при циклическом нагружении образцов до $(1 \div 2) \cdot 10^5$ циклов происходит увеличение характеристики шероховатости R_a, R_z, R_{max} практически при всех исследуемых нагрузках. Этот период циклического нагружения можно характеризовать как стадию рассеянного усталостного повреждения. С увеличением числа циклов нагружения более величины $(1 \div 2) \cdot 10^5$ циклов имеет место снижение характеристик шероховатости поверхности образцов вплоть до момента разрушения, что, по-видимому, связано с локализацией усталостного повреждения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. Т.2./ В. Т. Троценко, Г. В. Цыбанев, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов – Киев : Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. – 2009. – 664 с.
2. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов / С. Коцаньда – М. : Металлургия, 1976. – 456 с.
3. Красовский А. Я. Физические основы прочности / А. Я. Красовский. – К. : Наук. думка, 1977. – 140 с.