

Оценка предельного состояния материала при воздействии циклических и контактных нагрузок в условиях граничного трения

Г. В. Цыбанев^а, О. Н. Белас^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Секция прикладных проблем Президиума НАН Украины, Киев, Украина

Выполнено оптимальное планирование эксперимента и получены данные по оценке предельного состояния материала при комплексном воздействии циклических и контактных напряжений в масляной среде. Предложен подход к определению параметров нагружения, обеспечивающих максимальную долговечность трибосопряжения. При этом используется условие наступления одновременного отказа по механизмам усталости и изнашивания.

Ключевые слова: усталость, износ, планирование эксперимента, математическая модель, функции отклика, предельное состояние, долговечность.

Введение. Многие детали машин работают в условиях комбинированного воздействия сил трения, контактных и циклических напряжений в масляной среде. Каждый из этих факторов вносит определенный вклад в достижение материалом предельного состояния и последующий отказ в работе узла. Ранее [1] было показано, что зарождение трещины в циклически нагруженном элементе трибосистемы может быть инициировано либо неоптимальными условиями контакта и трения, либо высокой циклической нагрузкой, которая не позволяет реализовать начало разрушения за счет сил контакта и трения. При этом существует некоторый оптимальный уровень контактных напряжений и соответствующий уровень сил трения, при воздействии которых циклически нагруженный образец имеет наибольшую долговечность. Можно предположить, что при оптимальных условиях контакта и трения и заданном уровне амплитуды циклических напряжений предельное состояние материала в поверхностном слое образца, где происходит зарождение трещины, наступает одновременно от воздействия обоих факторов: сил трения и контакта – с одной стороны и циклической нагрузки – с другой.

Таким образом, материал проявляет равнопрочность к воздействующим механизмам повреждения. В работе [2] было показано, что подобные оптимальные условия могут быть определены экспериментально и для циклически нагруженной трибопары при модификации поверхности трения борированием или карбованадированием. При изменении уровня циклической нагрузки, сил контакта и трения, состава смазывающей среды изменяются также соотношения уровней механического воздействия, соответствующие максимальной долговечности циклически нагруженного элемента трибопары (далее эти условия будем называть оптимальными). В этой связи представляет интерес разработка подходов, позволяющих оценить предельное состояние материала и соответствующую долговечность в рассматриваемых условиях на основе ограниченных экспериментальных данных. Такая задача

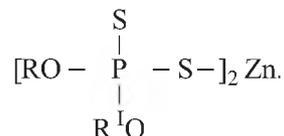
поставлена в данном сообщении, ее решением необходимо располагать при конструировании узлов и деталей машин, работающих в условиях усталости с трением.

Методика исследования. Экспериментальные исследования проводили в соответствии с ранее разработанной методикой [3], в основе которой лежат испытания на циклический изгиб с вращением образца круглого сечения с концентратором в виде выточки. Последняя является местом прижатия контртела для создания сил контакта и трения со стороны растягивающих напряжений от изгиба. Контртело выполнено в виде стержня круглого сечения, в результате чего реализуется контакт цилиндра по цилиндру. В зону контакта подводится смазка.

Материал и вид смазки. Циклически нагружаемый образец и контртело изготавливали из среднеуглеродистой нормализованной стали 45 со следующими механическими характеристиками: предел прочности $\sigma_b = 610$ МПа; предел текучести $\sigma_{0,2} = 410$ МПа; модуль упругости 1-го рода $E = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; относительное удлинение при разрыве $\delta = 25\%$.

Для смазки трущихся поверхностей использовали минеральное масло МС-20 в чистом виде (ГОСТ 9320–60), а также модифицированное добавками свободной серы, фосфор- и серофосфорсодержащих присадок. В дальнейшем эти смазочные среды обозначим соответственно МС-20, МС-20+S, МС-20Р и МС-20+ДФ.

Фосфорсодержащая присадка является одной из наиболее распространенных противоизносных присадок к минеральным маслам – трикрезилловый эфир фосфорной кислоты, или трикрезилфосфат $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{PO}$. В качестве серофосфорсодержащей присадки выбрано соединение пятивалентного фосфора с общей формулой – диалкилдитиофосфат цинка:



Диалкилдитиофосфаты цинка различаются между собой характером радикалов R и R¹. Данные соединения широко используются в качестве присадок, улучшающих антиокислительные, антикоррозионные и противоизносные свойства масел [4].

Составление плана эксперимента и выбор способа аналитического описания закономерностей. Предварительно отметим, что характеристикой уровня воздействия на материал сил контакта и трения является параметр, интегрирующий эти воздействия и определяемый в процессе испытаний на усталость с наложением трения, а именно: интенсивность изнашивания J . С использованием этого же параметра определяется предельное состояние материала по износу и долговечность при заданном его предельном значении.

Математическое описание зависимостей интенсивности изнашивания и усталостной долговечности от исследуемых факторов (контактное давле-

ние P_k , амплитуда циклического напряжения σ_a , состав масляной среды C) базируется на математической модели множественной регрессии и может быть представлено в виде количественных соотношений, связывающих текущие значения выходной функции с контролируемыми переменными. Информационной основой для определения параметров аналитической зависимости являются статистические данные, полученные в результате специально поставленного эксперимента. При математическом моделировании и последующей оптимизации учитывались вышеперечисленные факторы. Граничные значения выбранных факторов, уровни их варьирования, обозначения в матрице плана эксперимента приведены в табл. 1. Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным в соответствии с [5] представлены ниже:

для циклического напряжения σ_a :

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,78E - 0,2(F_1 - 3,94E + 0,2); \\ Z_1 &= 2,06(X_1^2 - 1,54E - 0,1X_1 - 4,82E - 0,1), \end{aligned}$$

для контактной нагрузки P_k :

$$\begin{aligned} X_2 &= 1,33E - 0,2(F_2 - 1,5E + 0,2); \\ Z_2 &= 2,25(X_2^2 - 2,1E - 10X_2 - 0,56); \\ U_2 &= 3,75(X_2^3 - 2,62E - 10X_2^2 + 2,91E - 11), \end{aligned}$$

для рабочей среды C :

$$\begin{aligned} X_3 &= 0,67(F_3 - 2,5); \\ Z_3 &= 2,25(X_3^2 - 0,56); \\ U_3 &= 3,75(X_3^3 - 0,91X_3). \end{aligned}$$

Учитывая, что аналитические зависимости между исследуемыми факторами отсутствуют, регрессионные зависимости можно записать в виде

$$J = f_1(P_k; \sigma_a; C); \quad (1)$$

$$N = f_2(P_k; \sigma_a; C). \quad (2)$$

Для получения коэффициентов регрессии уравнения составляли оптимальные планы эксперимента, результаты которого представляют ограниченную выборку, характеризующую поверхность отклика в n -мерном пространстве. При исследовании и оптимизации условий взаимного влияния процессов трения и усталости элементов трибосистемы использовали многофакторные регулярные планы, согласно которым при подготовке и проведении эксперимента выполняли следующие требования к исследуемым факторам [5]: независимость; совместимость; управляемость; точность замера; однозначность.

Т а б л и ц а 1

Факторы, варьируемые в эксперименте для получения выходных функций

Фактор	№ фактора, F_i	Обозначение уровней в матрице	Натуральные значения уровней
Циклическое напряжение σ_a , МПа	1	0	350
		1	400
		2	450
Контактная нагрузка P_k , МПа	2	0	4
		1	11
		2	18
		3	25
Рабочая среда C	3	0	МС-20
		1	МС-20+S
		2	МС-20+P
		3	МС-20+ДФ

Количество необходимых экспериментов определяли по методикам [5, 6], позволяющим оценить предварительную эффективность плана. Для выбранного числа факторов и уровней варьирования сгенерировано два ортогональных D -оптимальных плана с эффективностью 99%, включающих по 32 опыта каждый. План представлен в виде матрицы варьируемых факторов (табл. 2). При реализации экспериментов планы разбивались на ортогональные блоки по восемь опытов в каждом и выполнялись поблочно согласно методическим рекомендациям [5].

Т а б л и ц а 2

Матрица варьируемых факторов

№ опыта	Факторы		
	F_1	F_2	F_3
1	0	0	0
2	0	2	3
3	0	1	2
4	1	3	1
5	1	3	3
6	1	1	0
7	2	2	1
8	2	0	2
9	0	0	3
10	1	2	0
11	0	1	1
12	0	3	2
13	2	3	0
14	2	1	3

15	1	2	2
16	1	0	1
17	1	1	1
18	1	3	2
19	2	0	3
20	2	2	0
21	0	2	2
22	0	0	1
23	0	3	0
24	1	1	3
25	2	1	2
26	2	3	1
27	1	0	0
28	1	2	3
29	0	2	1
30	1	0	2
31	0	3	3
32	0	1	0

На основании полученных результатов эксперимента (таблица не приводится в связи с ее громоздкостью), которые составляют матрицу наблюдений, формируется система уравнений.

С целью сокращения времени обработки данных эксперимента и повышения точности вычислений осуществляли перевод натуральных значений уровней варьирования факторов к кодированным [6], где X_i – линейная функция (ортогональный контраст первого порядка) натуральной переменной; Z_i – квадратичная функция (ортогональный контраст второго порядка) натуральной переменной; U_i – кубическая функция (ортогональный контраст третьего порядка) натуральной переменной.

Для адекватного описания исследуемого процесса с помощью регрессионных зависимостей проверяли влияние взаимодействия факторов, ортогональность к главным эффектам и другим взаимодействиям. Расчет коэффициентов регрессии и выбор наиболее значимых переменных осуществлялся по алгоритму и программам, описанным в [7].

Результаты испытаний и их обсуждение. При обработке экспериментальных данных в соответствии с выбранной математической моделью получено регрессионное уравнение зависимости интенсивности изнашивания от исследуемых факторов в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 J = & 0,1627 - 0,00939X_1 + 0,0179X_2 - 0,0227X_3 + 0,00445Z_1 + 0,0151Z_2 + \\
 & + 0,0127Z_3 - 0,01181X_1X_2 - 0,00753Z_2X_3 - 0,00847X_2U_3 + \\
 & + 0,00656X_2Z_3 - 0,00363Z_1X_3.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Аналогичное регрессионное уравнение получено для циклической долговечности:

$$N = 289,5 - 193,5X_1 + 50,7Z_1 - 20,6X_2 - 35U_2 + 56,4U_3 - 32,3Z_1U_2 + 37,4Z_1U_3 + 44,3X_2Z_3 - 50,1Z_2X_3 - 40,8U_2U_3. \quad (4)$$

Регрессионные уравнения (3), (4) проверяли на адекватность, устойчивость, информативность [7] и представляли в кодовых переменных, что снижает их наглядность, но повышает устойчивость и информативность, так как модели в натуральных значениях неустойчивы из-за отсутствия ортогональных контрастов. Кроме того, использование натуральных значений вместо кодовых приводит к накоплению больших ошибок вследствие увеличения объема проводимых вычислений [5].

После того как найдена адекватная математическая модель объекта исследования, путем построения соответствующих геометрических поверхностей можно получить наглядное представление о геометрическом образе изучаемых функций отклика. В качестве примера некоторые из них приведены на рис. 1, 2. Графические зависимости по расчетным точкам представлены в декартовой пространственной системе координат.

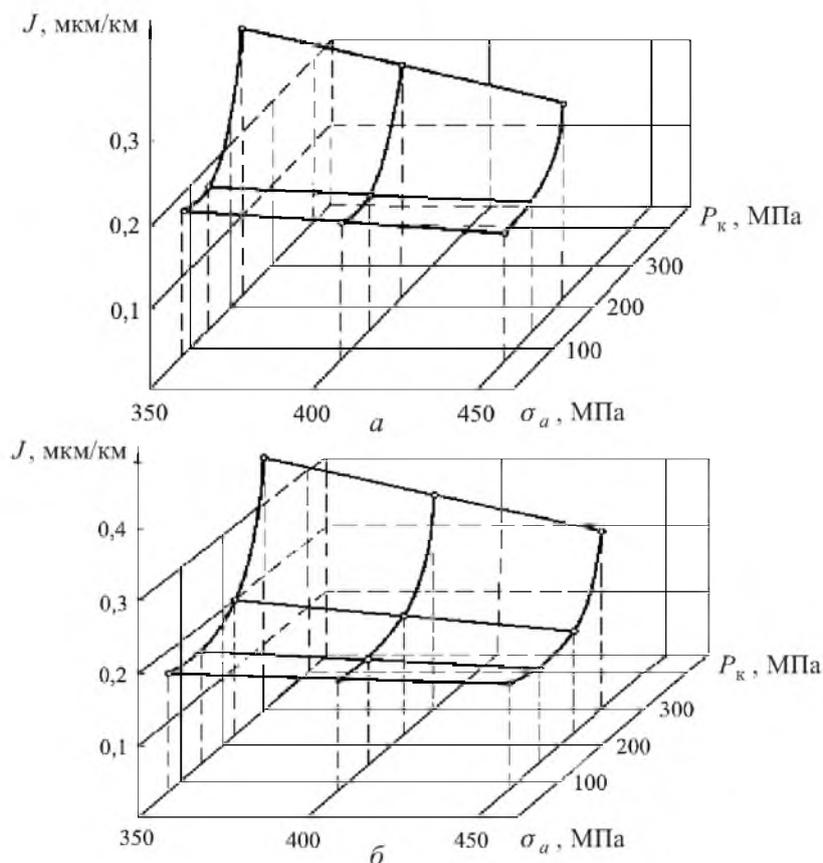


Рис. 1. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 в зависимости от контактной нагрузки и циклических напряжений в среде масел МС-20 (а) и МС-20+S (б).

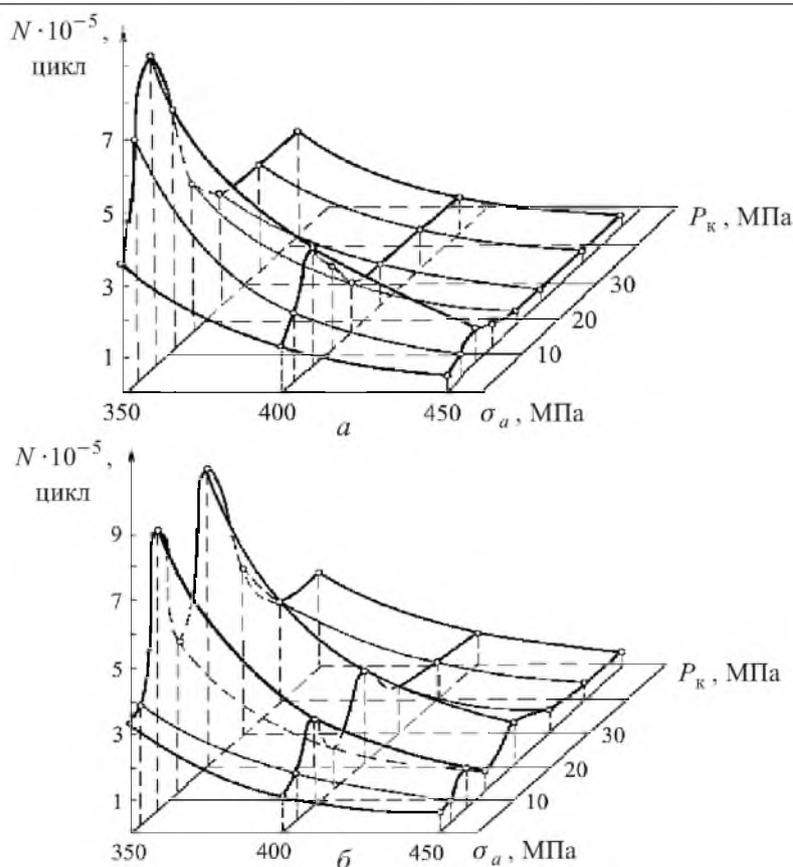


Рис. 2. Изменение усталостной долговечности стали 45 в зависимости от контактной нагрузки в среде масел МС-20 (а) и МС-20+S (б).

Для получения максимальной информации о положении оптимума применяют итерационные методы поиска оптимума и адаптационные методы оптимизации, например симплекс-планирование [8].

Анализ приведенных регрессионных зависимостей для каждой рабочей среды позволил определить области, в которых находится минимум (рис. 1) или максимум (рис. 2) функции отклика соответственно для интенсивности изнашивания и циклической долговечности.

Видно, что для масел МС-20, МС-20+S (рис. 1), а также для остальных исследованных масляных сред, как следует из зависимостей, существует минимум функций отклика (3) для каждой рабочей среды. Однако заметим, что все минимальные значения лежат в плоскости, соответствующей амплитуде циклического напряжения 450 МПа.

На рис. 2 представлены зависимости циклической долговечности от исследуемых факторов. Как видно, наблюдается более сложная зависимость от состава рабочей среды. Если для сред МС-20 (рис. 2,а), МС-20+Р и МС-20+ДФ существует явно выраженный максимум функции отклика (4), то для среды МС-20+S (рис. 2,б) установлено существование двух максимальных значений. Для данной регрессионной зависимости характерно нахождение максимальных значений в плоскости, соответствующей мини-

мальному определенному циклическому напряжению в материале, равному 350 МПа, где должны, естественно, реализовываться более высокие значения циклической долговечности.

Относительно влияния масляной среды отметим следующее. Противозносная эффективность пленок, образуемых на стальных поверхностях при работе в минеральных маслах, изучена достаточно хорошо. В результате многих исследований [9, 10] установлено одно из свойств кислородсодержащих пленок, формируемых на поверхностях трения: они могут образовываться при более низких температурах, чем пленки сульфидов и хлоридов. Благодаря такой “активности” кислорода поверхности трущихся образцов быстрее насыщаются, что приводит к сужению диапазона существования вторичных структур первого типа [9]. Условная граница раздела по типу пленок вторичных структур для данной среды (масло МС-20) соответствует значению $P_k = 7$ МПа (рис. 2,а).

При использовании в качестве добавки к маслу МС-20 свободной среды установлено наличие двух участков, где наблюдается значительное повышение усталостной долговечности (рис. 2,б). Сопоставление первого (левого) из них с полученным для масла МС-20 (рис. 2,а) свидетельствует об их практическом совпадении. По-видимому, при данных условиях нагружения еще не происходит взаимодействия серы с поверхностью материала образцов. В ряде работ [10, 11] отмечается, что антизадирный эффект серосодержащих присадок может проявляться только при повышенных температурах поверхности трущихся материалов. С учетом этого факта становится очевидным появление второго (правого) участка, где также отмечается повышение усталостной долговечности материала (рис. 2,б). Видимо, при контактной нагрузке $P_k = 15...21$ МПа начинается активное взаимодействие серы со сталью 45, в результате чего активируемые трущиеся поверхности насыщаются еще одним пассиватором – серой. Это приводит к изменению состава пленок вторичных структур и их свойства приближаются к свойствам вторичных структур первого типа кислородного происхождения. Дальнейшее увеличение контактной нагрузки, а значит, и уровня активирования материала для поддержания энергетического равновесия требует дополнительного насыщения трущихся поверхностей активными компонентами среды. Все это обуславливает образование вторичных структур второго типа [9], обладающих по сравнению с вторичными структурами первого типа большей поверхностной прочностью и меньшей пластичностью. В результате механических воздействий на поверхности трения материала возникает сетка микротрещин, которые являются концентраторами напряжений, а при действии циклических нагрузок способствуют зарождению трещин усталости, чем объясняется дальнейшее резкое снижение циклической долговечности при повышении P_k .

Таким образом, для достижения минимальной интенсивности изнашивания необходимо задавать максимально возможные значения циклического напряжения и обеспечивать реализацию оптимального режима трения с точки зрения положительного влияния на процессы усталостного разрушения материалов. Для получения максимального значения числа циклов до усталостного разрушения образцов следует задавать минимальную величину

ну циклических напряжений. Ввиду противоречивости требований к циклическому нагружению для определения условий нагружения элементов циклически нагруженной трибосистемы, обеспечивающих наступление их предельного состояния от усталости или износа при заданной долговечности, необходимо разработать специальный подход, позволяющий использовать полученную информацию о свойствах материала при усталости с наложением трения в виде зависимостей (3), (4).

Разработка подхода по оценке оптимальных условий нагружения для обеспечения заданной долговечности. Как отмечалось выше, в экспериментах по усталости с наложением трения скольжения наблюдаются определенные соотношения между циклическими, контактными напряжениями и напряжениями от сил трения, названные авторами оптимальными условиями, при которых элементы циклически нагруженной трибосистемы имеют максимальную долговечность. В этих условиях предельное состояние материала наступает одновременно от действия механизмов усталости и трения. Представляется целесообразным в качестве критерия оптимизации ввести такие условия нагружения, при которых обеспечивается равенство долговечностей элементов циклически нагруженной трибосистемы, определяемое как по механизму усталости, так и по механизму изнашивания. Как для предельного износа, так и для циклической долговечности общим параметром, определяющим момент наступления предельного состояния материала, является время воздействия исследуемых силовых факторов. Обозначим этот критерий через T . С помощью математических моделей (3), (4) можно перейти к его определению для каждого из действующих механизмов разрушения.

Интенсивность изнашивания $J = f_1(P_k; \sigma_a; C) = \Delta/L = [\text{мкм/км}]$ определяет величину линейного износа материала Δ , отнесенного к пути трения L . При этом скорость скольжения V в эксперименте была постоянной и составляла 0,785 м/с. Следовательно, для учета влияния скорости скольжения на процессы повреждения материала может быть рассмотрена величина $J_T = JV = (\Delta/L)V = [\text{мкм/час}]$, где $T = L/V$.

Таким образом, зависимость (1) может быть представлена в виде

$$J_T = f_3(P_k; \sigma_a; C; V), \quad (5)$$

где T обозначает переход к зависимости с учетом временного фактора.

Непосредственная взаимосвязь между J_T и временем наступления предельного состояния материала элементов трибосистемы по механизму изнашивания $T_{\text{и}}$ может быть определена с учетом установленного для заданного трибозла уровня допустимого износа A [мкм]:

$$T_{\text{и}} = A/J_T = [\text{ч}]. \quad (6)$$

Аналогично для зависимости $N = f_2(P_k; \sigma_a; C)$, по которой определяется число циклов до установленного разрушения образца пары трения, перейдем к критерию T . Время наступления предельного состояния материала по механизму усталости вычисляем по частоте вращения образца f , которая характеризует количество циклов нагружения за единицу времени:

$$T_N = N/f = [\text{ч}], \quad (7)$$

т.е. в этом случае кроме циклических напряжений учитывается влияние такого параметра испытаний на усталость, как частота вращения образца.

С учетом выполненных преобразований зависимость (2) может быть записана в следующем виде:

$$N_T = f_4(P_k; \sigma_a; C; f). \quad (8)$$

Таким образом, условием оптимизации (достижение максимальной долговечности элементами циклически нагруженной трибосистемы) является равенство

$$T_{\text{и}} = T_N. \quad (9)$$

На рис. 3 показаны кривые, полученные в результате пересечения двух поверхностей отклика ($T_{\text{и}}$ и T_N) для двух рабочих сред, которые удовлетворяют условию (9) и соответственно отображают параметры нагружения трибопары, обеспечивающие ее максимальную долговечность.

Оптимальные условия работы элементов циклически нагруженной трибосистемы для некоторых конкретных значений параметров представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Величины контактных и циклических напряжений, обеспечивающие максимальную долговечность стали 45 в различных по составу средах

Среда	σ_a , МПа	P_k , МПа	T , ч
МС-20	350	30	1,2
	355	25	1,5
	365	18	1,5
	380	11	1,5
	415	7	1,5
	380	4	1,5
	400	5	1,6
	400	8	1,6
МС-20+Р	350	10	2,4
	375	4	2,2
	350	2	2,0
МС-20+S	360	25	2,05
	385	18	2,05
	360	11	1,9
	385	7	1,9
	355	4	1,8
МС-20+ДФ	355	30	2,8
	360	25	2,7
	370	18	2,6
	380	11	2,3
	385	7	2,2
	375	4	2,1

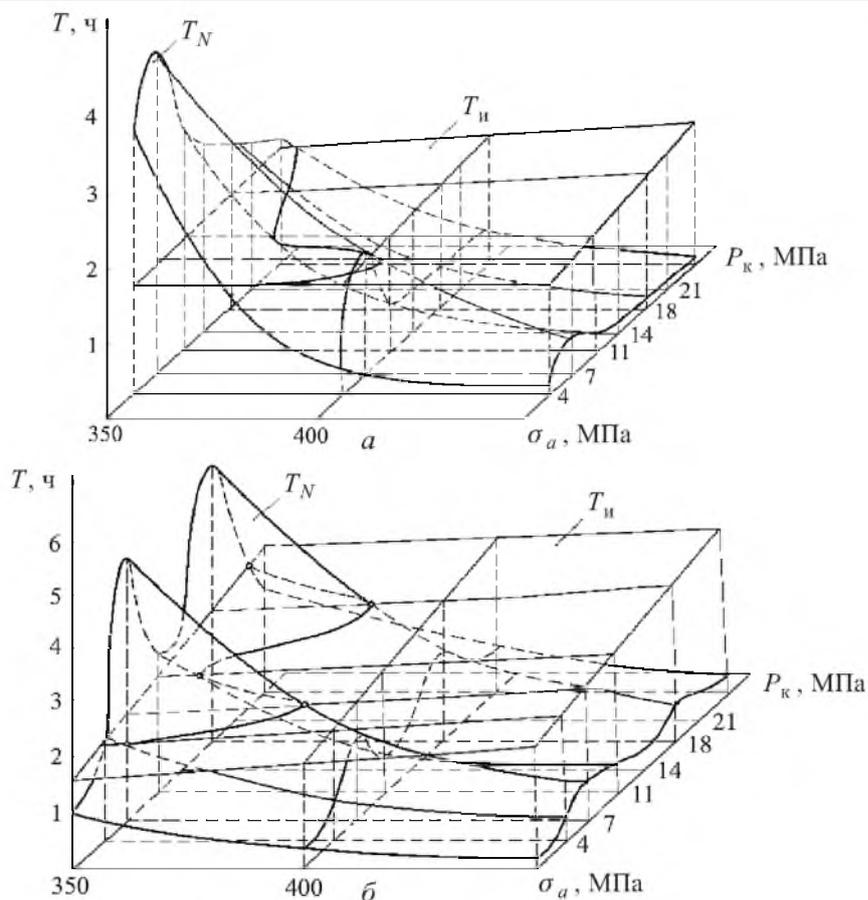


Рис. 3. Изменение критериев долговечности по износостойкости и усталости в среде масел MS-20 (а) и MS-20+S (б).

Заключение. С целью обеспечения максимальной долговечности элементов трибосистемы при циклическом нагружении одного из них предложено использовать критерий одновременного наступления предельного состояния материала по механизмам усталости и изнашивания. Для решения конкретной задачи выполнено оптимальное планирование эксперимента, использованы математические модели множественной регрессии, проведен эксперимент и получены параметры функций отклика по изнашиванию и циклической долговечности для различных условий нагружения и смазочных сред. Переход к временным зависимостям, отражающим скорость скольжения при трении и частоту циклического нагружения, позволяет найти соотношение между величинами силового воздействия, при которых элементы трибосистемы имеют наибольшую долговечность ввиду равнопрочности материала к механизмам разрушения по изнашиванию и усталости. Предложенный подход может быть использован в расчетах при конструировании элементов трибосопряжений, подверженных циклическим нагрузкам.

Установлено, что путем направленного легирования смазочных сред можно управлять процессами пассивации при трении и изнашивании материалов, от которых зависит их сопротивление усталости. Изменяя положение

ние и размер области существования вторичных структур первого типа оптимального состава, можно управлять усталостной долговечностью элементов трибосистемы, значительно ее увеличивая.

Резюме

Сплановано експерименти і отримано результати щодо оцінки граничного стану матеріалу за комплексної дії циклічних та контактних напружень у мастильному середовищі. Запропоновано підхід до визначення параметрів навантаження, що забезпечують максимальну довговічність трибосполучення. При цьому використовується умова настання одночасної відмови за механізмами втоми та зношування.

1. Носовский И. Г., Цыбанев Г. В., Белас О. Н. Влияние предварительного циклического нагружения на износостойкость стали // Пробл. прочности. – 1990. – № 4. – С. 31 – 34.
2. Цыбанев Г. В., Белас О. Н. Исследование влияния модификации поверхностного слоя стали 45 на характеристики сопротивления разрушению при циклическом нагружении с наложением трения // Там же. – 2004. – № 2. – С. 67 – 76.
3. Цыбанев Г. В., Белас О. Н. Методика испытаний на усталость материала элементов трибосистем // Там же. – 1991. – № 8. – С. 72 – 77.
4. Папок К. К., Рагозин Н. А. Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и специальным жидкостям. – М.: Химия, 1975. – 392 с.
5. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. – Киев: Техніка, 1984. – 200 с.
6. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
7. Разработка и внедрение методики испытаний агрегатов и узлов на основе методов математической теории планирования эксперимента (обобщенный отчет за 1975–83 гг.). – Киев: Киев. политехн. ин-т, 1983. – 96 с.
8. Вознесенский В. А., Ковальчук А. Ф. Принятие решений по статистическим моделям. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.
9. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Караулов А. К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техніка, 1976. – 296 с.
10. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
11. Виноградов Г. В., Подольский Ю. Д. Механизм противоизносного и антифрикционного действия смазочных сред при тяжелых режимах граничного трения // О природе трения твердых тел. – Минск: Наука и техника, 1971. – С. 281 – 304.

Поступила 26. 11. 2004