

УДК 620.17:621.891

О.Н.Белас

Секция прикладных проблем Президиума НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 45

В статье приведены и проанализированы результаты исследования влияния циклической нагрузки на интенсивность изнашивания стали 45 при однонаправленном скольжении в контакте с контртелом из этой же стали. Показано, что наличие циклической нагрузки и низкого, и высокого уровня по сравнению с пределом выносливости приводит к ухудшению триботехнических характеристик исследованной стали. Установленный эффект автор связывает с ухудшением условий скольжения в контакте за счет усталостных повреждений в поверхностном слое. Периоды начального упрочнения, зарождения трещины и ее роста, характерные для «чистой» усталости, присутствуют и на зависимостях интенсивности изнашивания от числа циклов нагружения при наложении усталости и трения.

Постановка проблемы. Надежность и долговечность машин обусловлена сохранением во времени объемной и поверхностной прочности материалов при действии нагрузок и среды. Процессы объемного разрушения протекают в результате накопления в материале дефектов его структуры, зарождения и распространения трещины, приводящих к акту макроскопического разрушения детали или конструкции. Процессы поверхностного разрушения состоят из таких же этапов, но при наличии контакта и трения добавляется большое количество микроскопических актов разрушения, проявляющихся в постепенном уменьшении объема материала – износе.

В результате использования представлений и методов физики металлов разработаны теории пластичности, хрупкого и вязкого разрушений, усталости и ползучести, получены новые результаты в теории внутреннего трения, реологии. Недостаточная же изученность физики поверхностной прочности материалов не дает возможности для обоснованного прогнозирования и трактовки процессов повреждения и разрушения в поверхностных слоях материалов. При наличии трения это объясняется рядом объективных причин: принципиальными трудностями выделения объекта разрушения и его прямого наблюдения; термодинамической неравновесностью протекающих процессов и необходимостью рассмотрения и изучения их кинетики; влиянием среды на всех этапах протекания процессов деформирования и разрушения.

Во многих случаях узлы трения машин и механизмов работают при одновременном воздействии циклического объемного нагружения и поверхностного нагружения трением (коленчатые валы, оси, зубья шестерен и т.п.), что еще больше усложняет анализ процессов в поверхностном слое. Износостойкость материала в значительной степени зависит от прочности его поверхностного слоя. Характеристики сопротивления усталости материалов также существенно зависят от многих параметров поверхностного слоя. Таким образом, взаимодействие циклической нагрузки и нагружения трением является весьма интересной задачей как с точки зрения оценки долговечности и критериев разрушения материалов, так и с позиций изучения механизмов взаимодействия указанных процессов, протекающих в поверхностном слое материала. Этому вопросу посвящено ограниченное количество экспериментальных данных [1, 2], а данные о влиянии циклического нагружения на износостойкость материалов, практически, отсутствуют. Предварительные исследования позволили высказать гипотезу о существенном влиянии циклического нагружения на трибопроцессы [3], что необходимо учитывать при оценке ресурса трибосопряжений. Для экспериментальной проверки данной гипотезы и решения поставленных задач использовали электронную микроскопию и метод акустической эмиссии.

Материалы и методика испытаний при усталости с наложением трения скольжения. Испытания пар трения при действии на образец циклической нагрузки проводили на экспериментальной установке [4] в условиях граничной смазки маслом МС-20 при скорости скольжения 0,785 м/с. Экспериментальная установка создана на базе машины УКИ-10М для испытания металлов на усталость при консольном изгибе вращающегося образца. Для испытаний выбран образец типа VIII по ГОСТ 25.502-79 с диаметром рабочей части 5 мм, изготовленного из стали 45 в нормализованном состоянии. Частота нагружения равнялась 50 Гц. По результатам

эксперимента строили кривые усталости на базе 10^6 циклов и определяли предел ограниченной выносливости σ_L , который в масле МС-20 равен 315 МПа.

К образцу в зоне концентратора напряжений через контртело прикладывали нагрузку трением и фиксировали линейный износ. Контртела были изготовлены из того же материала, что и образцы. Схема сопряжения пары трения: "цилиндр - цилиндр" при начальном герцевском контакте по линии. Нагрузку трения варьировали в диапазоне реализации нормального механохимического изнашивания, границы которого были установлены при предварительных триботехнических испытаниях образцов без циклического нагружения и соответствовали контактному напряжению P_k в диапазоне (5...350) МПа.

Использование метода акустической эмиссии. В результате анализа существующих способов и методик испытания пар трения была разработана методика с использованием метода акустической эмиссии (АЭ) [5], позволяющая учитывать влияние циклического нагружения на интенсивность изнашивания материалов. В основе методики лежит способ испытания пары трения [6], включающий операции сопряжения элементов пары трения, нагружения ее сжимающей силой, обеспечение относительного скольжения элементов пары трения, с регистрацией при этом сигналов АЭ, возникающей в контакте, и установлением зависимости интенсивности изнашивания (J) от акустико-эмиссионной информационной энтропии ($H_{АЭ}$):

$$J = a + v \cdot H_{АЭ}. \quad (1)$$

где a и v – коэффициенты, зависящие от выбора материалов элементов трибосистемы и схемы контакта.

Затем проводили такие же испытания пары трения, но к образцу в процессе испытания одновременно прикладывали циклическую нагрузку величиной

$$\sigma_y^u < \sigma_a < \sigma_m, \quad (2)$$

где σ_y^u – циклический предел упругости, σ_m – предел текучести материала.

Выбор уровня амплитуды напряжения выше σ_y^u объясняется предположением, что при $\sigma < \sigma_y^u$ в материале происходят весьма малые повреждения в результате циклического нагружения, в связи с чем их влияние на триботехнические характеристики будут незначительны. За величину σ_y^u принят указанный выше ограниченный предел выносливости. Ограничение ($\sigma < \sigma_m$) пределом текучести, определенным для статического нагружения, обусловлено отсутствием необходимости определения свойств материала пары трения, когда теряется несущая способность материала, ввиду значительных остаточных деформаций, что недопустимо для реальных деталей. Регистрация параметров АЭ и использование установленной зависимости (1) позволяет определять текущее значение интенсивности изнашивания для случая циклического нагружения элемента трибосопряжения. В качестве параметра оценки степени влияния циклического нагружения на интенсивность изнашивания материала элементов трибосопряжения использовали параметр (I):

$$I = (J^u / J - 1) \cdot 100 \% \quad (3)$$

где J^u – интенсивность изнашивания при наложении циклической нагрузки и трения.

Величина параметра I показывает долю прироста значения интенсивности изнашивания при наложении циклической нагрузки по сравнению с ее значением, полученным при обычных испытаниях пары трения.

Результаты испытаний и их обсуждение. В соответствии с приведенной выше методикой выполнены эксперименты по оценке влияния циклических повреждений в приповерхностном слое на такие триботехнические параметры стали 45, как интенсивность изнашивания и критическое контактное давление $P_{кр}$. Последний параметр характеризует контактное давление в исследуемой паре, при котором происходит переход от нормального механохимического изнашивания к повреждаемости (схватыванию, питтингу) трущихся поверхностей и, соответственно, к резкому возрастанию интенсивности изнашивания. На рис. 1 приведены зависимости интенсивности изнашивания от контактного давления, полученные при обычных испытаниях пары трения (кривая 1) и при испытании пары трения в условиях циклического нагружения (кривая 2).

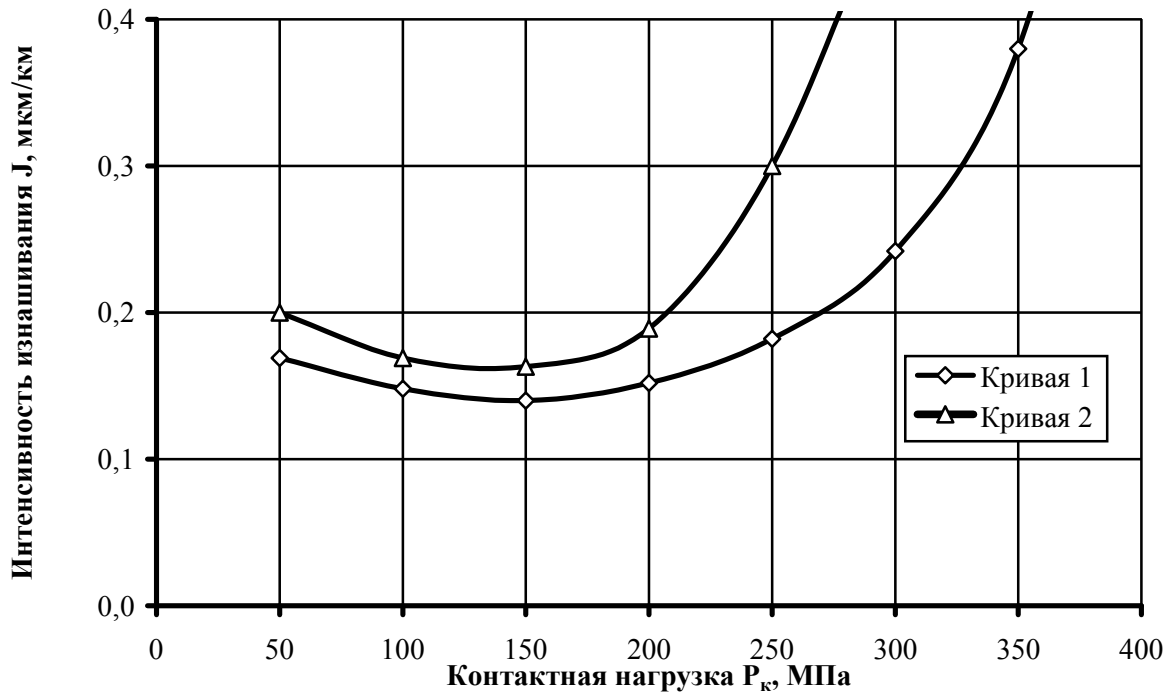


Рис. 1. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 в зависимости от контактной нагрузки в условиях граничной смазки маслом МС-20: 1) $\sigma_a = 0$ МПа; 2) $\sigma_a = 400$ МПа.

Как следует из приведенных данных, значения $J^u = f(P_k)$, полученные при тех же условиях трения, но при наличии циклических напряжений в образце, отличается от значений $J = f(P_k)$, полученных при испытании материала только на трение и износ. Это связано с тем, что в результате действия циклической нагрузки в материале накапливаются усталостные повреждения [7, 8]. Особенно интенсивно усталостные процессы проходят в поверхностных и приповерхностных слоях [8], ответственных за процессы изнашивания материала, что и отражается на параметрах АЭ, регистрируемых в процессе работы пары трения, по которым определяли значение акустико-эмиссионной информационной энтропии ($H_{АЭ}^u$). По установленным параметрам зависимости J от $H_{АЭ}^u$ определяли значение интенсивности изнашивания пары трения при действии циклической нагрузки.

Для анализа поверхностных дефектов в циклически нагружаемом образце трибосистемы были использованы микрофотографии его поверхности, выполненные методом электронной микроскопии (рис. 2). Как следует из приведенных микрофотографий, при нормальном трении поверхности материалов элементов трибосопряжения имеют бездефектную структуру, хорошо выглаженную с мелкими царапинами по направлению скольжения (рис. 2-а). На всех рисунках направление скольжения соответствует видимым линиям на микрофотографиях, являющихся следами скольжения контртела по образцу. При нагружении образца циклической нагрузкой, кроме отмеченных дефектов на поверхности трения обнаружены отдельные микротрещины, расположенные под различными углами к направлению скольжения (рис. 2-б).

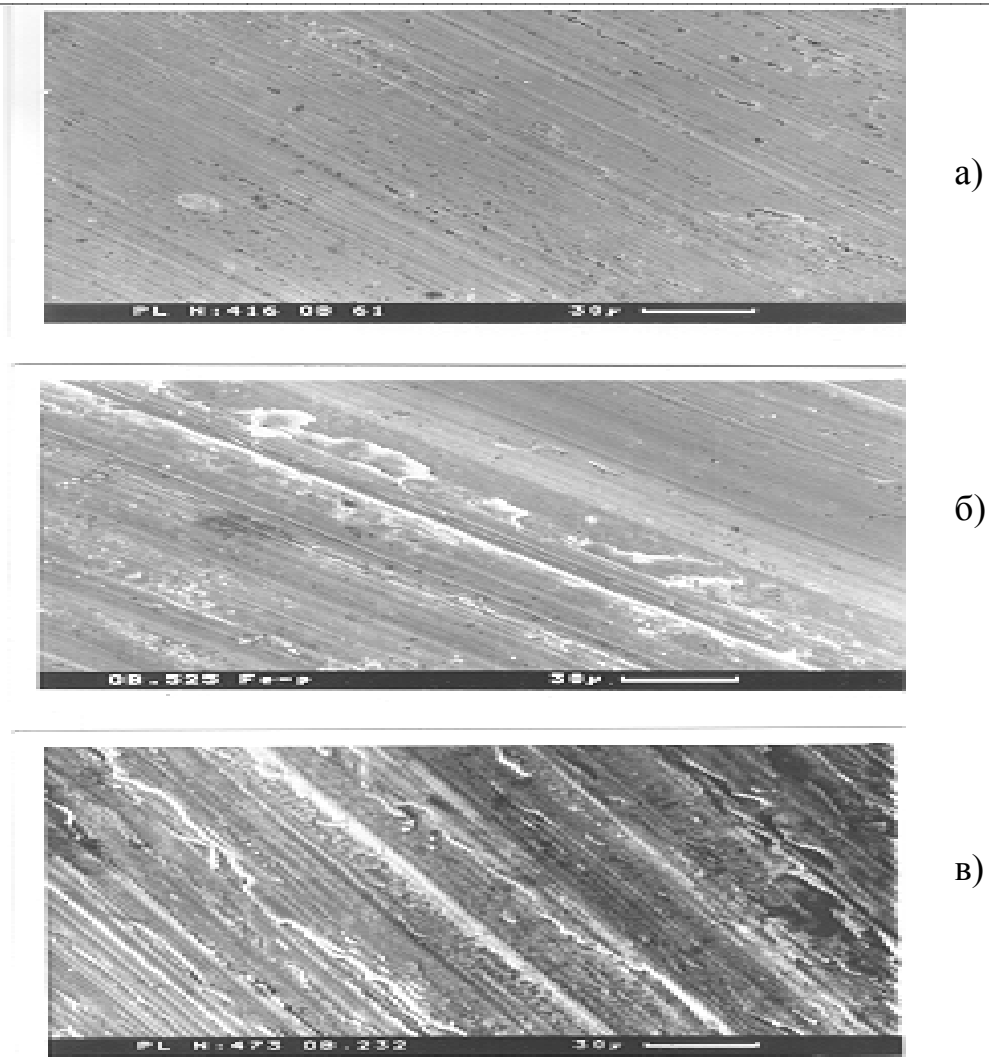


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей трения образцов из стали 45, испытанных в условиях граничной смазки маслом МС-20: а) нормальное изнашивание ($\sigma_a = 0$ МПа); б) нормальное изнашивание при циклическом нагружении ($\sigma_a = 400$ МПа); в) повреждаемость при циклическом нагружении ($\sigma_a = 400$ МПа).

Следовательно, при комбинированном нагружении в пределах нормального износа вид поверхности трения несколько изменяется в сторону ее огрубления, что связано с микропластическими деформациями в виде полос и линий скольжения в благоприятно расположенных для этого зернах поликристалла и воздействием на них сил трения и контакта со стороны контртела.

При приближении контактного давления к его критическому значению плотность и интенсивность повреждений в поверхностном слое увеличивается (рис. 2-в) при том же циклическом напряжении, что связано с появлением очагов микроразрушения при взаимодействии микротрещин и следов пластических деформаций образца и контртела.

Таким образом, из рисунков 1 и 2 следует, что при увеличении контактного давления повышается износ элементов трибосопряжения, а при действии циклической нагрузки это приводит к еще более значительному повышению интенсивности изнашивания материала и ухудшению состояния поверхности трения. В последнем случае ярко проявляет себя взаимное влияние процессов трения и усталости материалов. При увеличении контактного давления на узел трения происходит естественное увеличение значений триботехнических характеристик [9], в то же время изменение воздействия на поверхностные слои материала приводит к интенсификации процесса усталостного разрушения, что в обратном порядке оказывает существенное влияние на протекание трибопроцессов. В результате такого взаимного влияния процессов трения и усталости износостойкость стали 45 понизилась приблизительно на 17 % с одновременным уменьшением

диапазона нормального трения в 1,4 раза в условиях испытаний, приведенных в табл. 1. При этом в качестве параметра оценки степени влияния циклического нагружения на изменение диапазона нормального трения использовали параметр (Γ):

$$\Gamma = P_{ккр} / P_{ккр}^H \quad (4)$$

где $P_{ккр}^H$ – критическое контактное давление при наложении усталости и трения.

Таблица 1

Результаты испытаний пар трения в условиях смазки маслом МС-20 при $P_k = 150$ МПа

Параметр	Циклическая нагрузка	
	$\sigma_a = 0$ МПа	$\sigma_a = 400$ МПа
J , мкм/км	0,140	0,163
$P_{ккр}$, МПа	360	250
I , %	–	16,4
Γ , ед.	–	1,44

Так как интенсивность усталостного повреждения материала и, прежде всего, поверхностного слоя изменяется в процессе циклического нагружения в связи с прохождением различных стадий усталости, длительность которых зависит от амплитуды напряжения [7, 8], триботехнические характеристики материала будут зависеть и от величины циклической нагрузки, приложенной к узлу трения, и от длительности ее приложения. Для выяснения этого вопроса дополнительно исследовали процесс изнашивания нормализованной стали 45, в широком диапазоне значений контактных давлений и амплитудах циклических напряжений 350 и 450 МПа, превышающих базовый ограниченный предел выносливости соответственно на 11 % и 43 % и приложенных к одному из элементов трибосопряжения. Кроме того, испытания проводили при постоянном удельном давлении во фрикционном контакте ($P_k = 150$ МПа) и при различных уровнях циклической нагрузки (σ_a), которые соответствовали: 350; 400; 450 МПа.

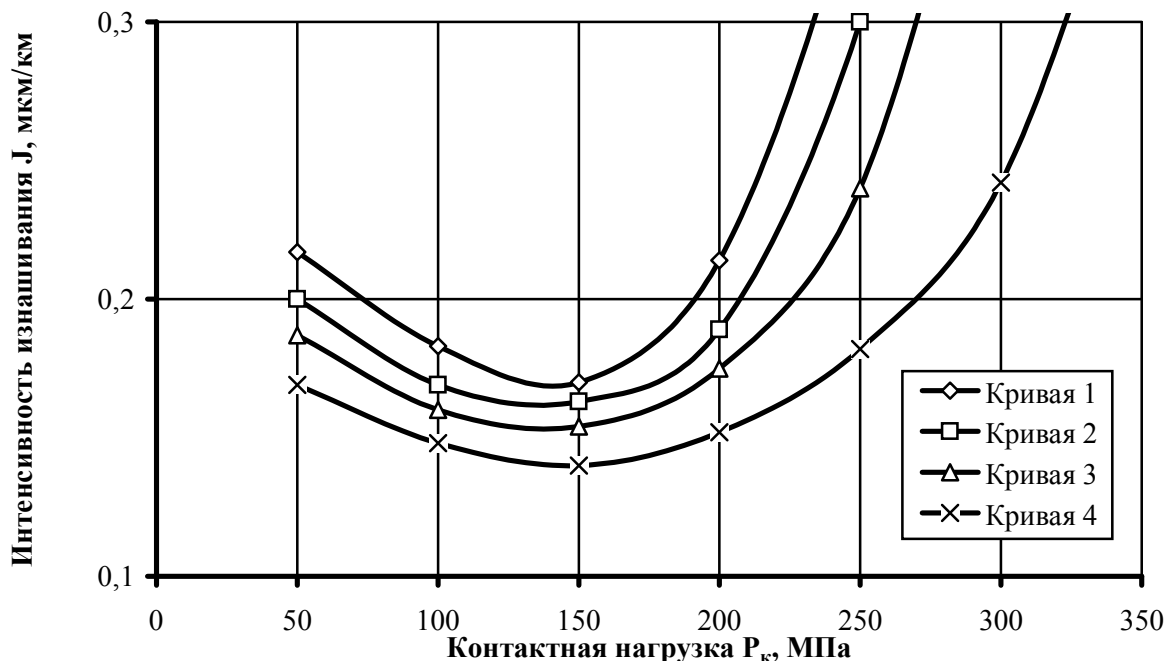


Рис. 3. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 в зависимости от контактной нагрузки: 1) $\sigma_a = 350$ МПа; 2) $\sigma_a = 400$ МПа; 3) $\sigma_a = 450$ МПа; 4) $\sigma_a = 0$ МПа.

На рис. 3 представлены результаты исследования интенсивности изнашивания в зависимости от величины циклической нагрузки. Можно установить общую закономерность влияния циклического нагружения на триботехнические характеристики испытанной пары трения, которая заключается в существенном уменьшении диапазона нормального трения и повышении ©О.Н.Белас

интенсивности изнашивания материала элементов трибосистемы при всех реализованных амплитудах напряжений. Однако, следует обратить внимание на влияние величины циклической нагрузки на износостойкость стали 45.

Так, при циклическом нагружении одного из элементов трибосопряжения, создающем напряжения в материале равные 350 МПа (кривая 1 на рис. 3), значения триботехнических характеристик имеют наихудшие показания (табл. 2). Это, по-видимому, связано с тем, что при невысоком уровне циклических напряжений в материале ($\sigma_a = 1,11 \cdot \sigma_l = 350$ МПа) для усталостного разрушения образца требуется большее количество циклов нагружения. То есть интенсивность протекания усталостных процессов относительно невысока и упрочнение поверхностных слоев [8] происходит на значительном промежутке времени, а, следовательно, последующее разупрочнение и зарождение трещин усталости смещается в область большего числа циклов нагружения [7]. То же самое касается и распространения усталостных трещин в объеме материала. Изменения же, происходящие в поверхностных слоях материал, не могут не сказаться на его износостойкости, что и было установлено. На стадии зарождения трещин на свободной поверхности образуются интрузии и экструзии за счет выхода устойчивых полос скольжения, формирующие рельеф поверхности, что, в основном, и приводит к увеличению износа материала. "Расшатывание" поверхностной структуры материала в результате действия циклической нагрузки способствует более раннему возникновению начальной повреждаемости поверхностей трения (рис. 4-а) и схватыванию элементов трибосистемы (кривая 1 на рис. 3).

Таблица 2

Результаты испытаний и расчетные параметры пар трения в условиях граничной смазки маслом МС-20 при контактном давлении $P_k = 150$ МПа и циклическом нагружении

σ_a , МПа	0	350	400	450
$P_{ккр}$, МПа	360	220	250	280
J , мкм/км	0,140	0,170	0,163	0,154
I , %	–	2,14	1,64	1,00
Γ , ед.	–	1,64	1,44	1,29

При напряжениях в материале равных 450 МПа (кривая 3 на рис. 3), что соответствует $\sigma_a = 1,43 \cdot \sigma_l$, процесс упрочнения поверхностных слоев происходит значительно интенсивнее. Этим можно объяснить повышение износостойкости стали 45, т.к. степень упрочнения поверхностных слоев при увеличении циклической нагрузки возрастает [7], а интенсивность изнашивания связана со свойствами вторичных структур, образующихся на поверхности трения в процессе изнашивания и взаимодействия с окружающей средой [9], т.е. с их прочностью, хрупкостью, твердостью и прочностью сцепления с основой (рис. 4-в). При таких условиях нагружения более раннее зарождение микротрещин усталости в некоторой степени разгружает поверхностные слои материала, не давая им разупрочниться, что способствует увеличению диапазона нормального трения (кривая 3 на рис. 3).

При напряжениях в материале равных $\sigma_a = 1,27 \cdot \sigma_l = 400$ МПа зависимость интенсивности изнашивания от удельного давления в контакте занимает промежуточное положение (рис. 4-б и кривая 2 на рис. 3).

Уместно отметить, что приведенные на рис. 3 зависимости и микрофотографии поверхностей трения на рис. 4 получены при циклических наработках, составляющих приблизительно 90 % от долговечности, что приводит к описанным выше закономерностям изменения триботехнических параметров. Как будет показано ниже, при других значениях числа циклов нагружения степень снижения указанных триботехнических величин будет находиться в другом соотношении с приложенными амплитудами напряжений.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что износостойкость стали 45 существенно изменяется в зависимости от уровня циклического нагружения. Процессы трения и изнашивания протекают при взаимодействии поверхностей тел, поэтому состояние и структура поверхности оказывают решающее влияние на формирование сил трения и на механизмы изнашивания [9]. А так как процесс разрушения материала при усталости можно разделить на несколько периодов [7,8], то износостойкость стали будет также изменяться при переходе от одного периода к другому.

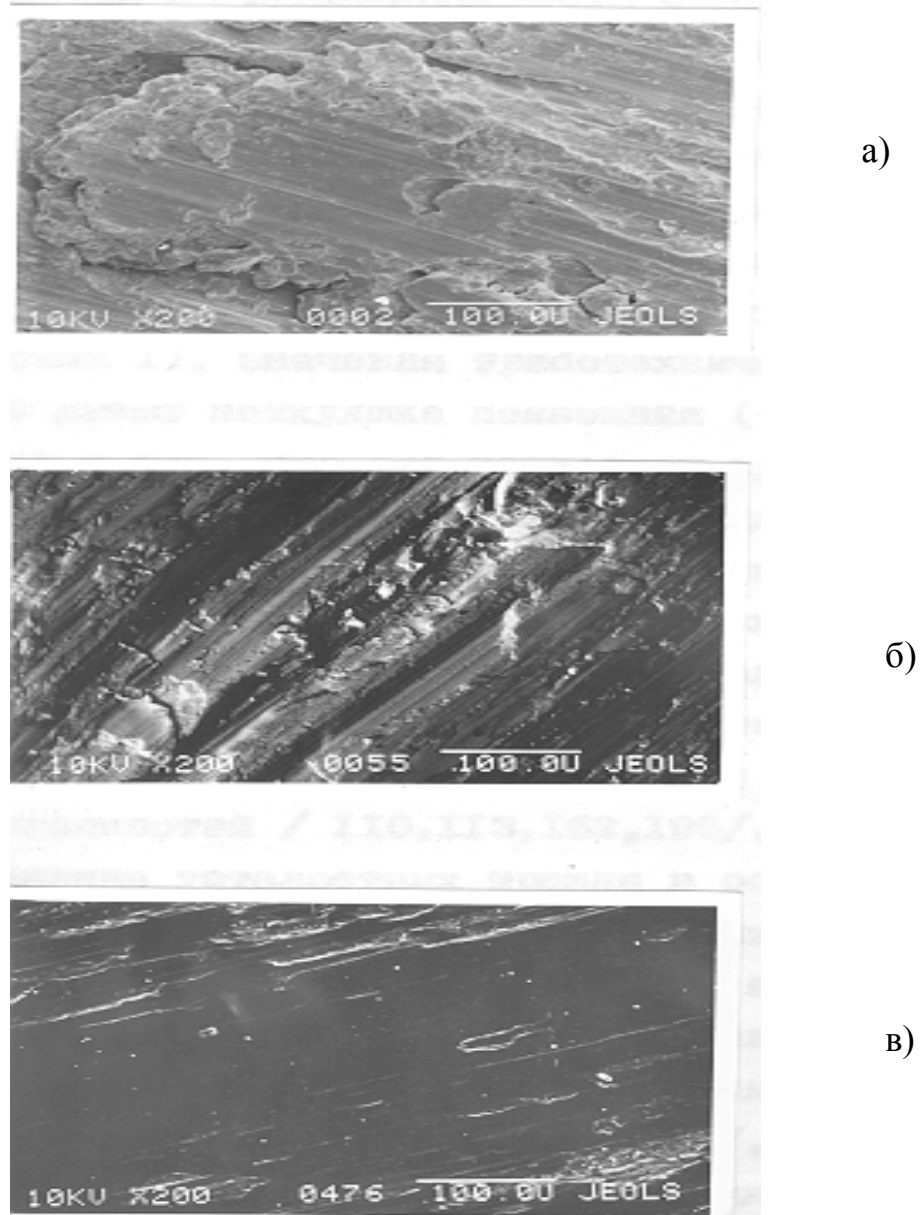


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей трения образцов из стали 45, испытанных в условиях граничной смазки маслом МС-20 и циклического нагружения: а) $\sigma_a = 350$ МПа; б) $\sigma_a = 400$ МПа; в) $\sigma_a = 450$ МПа.

Динамика изменения интенсивности изнашивания материалов элементов трибосопряжения при действии циклической нагрузки приведена на рис. 5. При сравнении значений интенсивности изнашивания в зависимости от величины циклической нагрузки были получены результаты, показывающие на увеличение износа для любого уровня циклической нагрузки по сравнению со случаем ее отсутствия. Однако, при рассмотрении динамики изменения интенсивности изнашивания от числа циклов нагружения, отчетливо видно деление кривых по виду в зависимости от величины циклической нагрузки, что позволяет косвенно отметить наличие периодов (кривые 2 и 3 на рис. 5), связанных с процессом усталостного разрушения материала [10, 11]. Так, при напряжениях в материале равных 350 МПа (кривая 1 на рис. 5) в процессе испытаний воздействие циклического нагружения на износ постоянно возрастает, хотя и незначительно, что связано, как уже было отмечено, с относительно неинтенсивным протеканием усталостных процессов, поэтому их вклад в процесс изнашивания материала с течением времени возрастает (накапливаются повреждения), а прохождение периодов, отмеченных для кривых 2 и 3 на рис. 5, менее заметно. При увеличении циклической нагрузки на образец пары трения (кривые 2 и 3 на рис. 5) происходит изменение вида кривых. Общим для них является наличие рельефно

©О.Н.Белас

определенных участков возрастания и убывания значений интенсивности изнашивания. Участок возрастания, характеризующий повышение интенсивности изнашивания материала, обусловлен образованием интрузий и экструзий за счет выхода устойчивых полос скольжения и другими процессами, приводящими к ухудшению физико-механических свойств поверхностных слоев. При зарождении магистральной усталостной трещины происходит разгрузка поверхностных слоев, как бы частичное выключение их из процесса усталостного разрушения, поэтому, видимо, и происходит перелом кривых – переход к ниспадающему участку, т.к. трещина распространяется в основном по одному наиболее слабому сечению, тем самым не давая разупрочниться всему поверхностному слою. Низкие значения интенсивности изнашивания (крайние точки кривых 2 и 3 на рис. 5), т.е. повышение износостойкости материала, достигается за счет увеличения твердости и снижения пластичности поверхностного слоя при циклическом нагружении с трением. Общий уровень износа оказался выше для образцов, подвергнутых действию наименьшей циклической нагрузки.

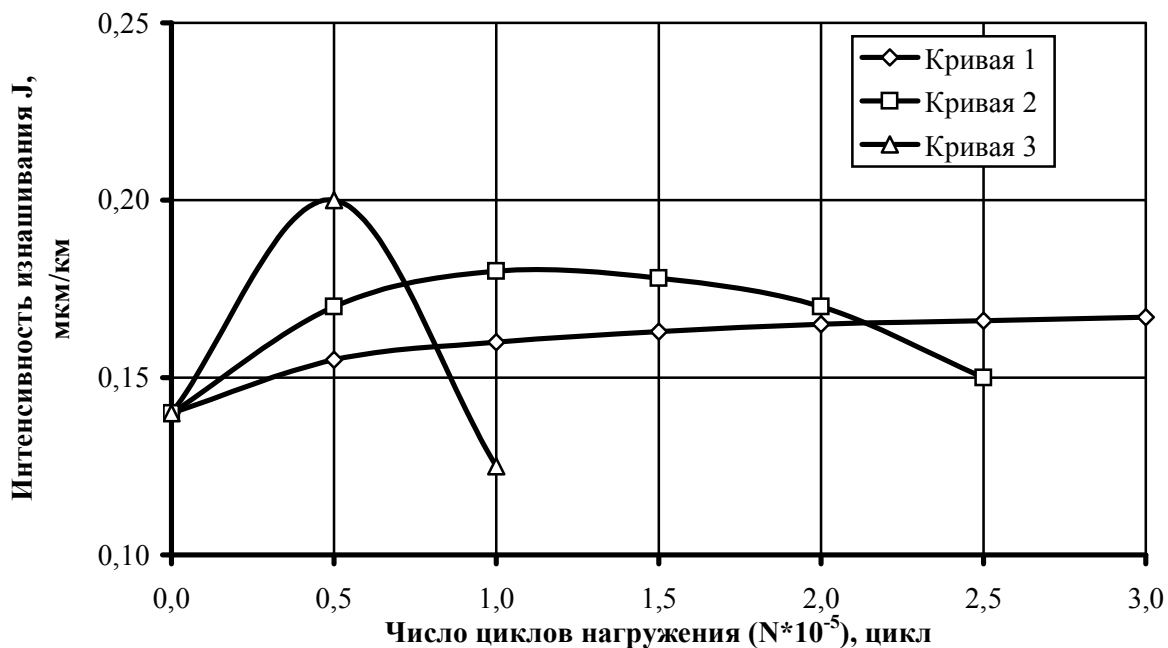


Рис. 5. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 при граничной смазке маслом МС-20 в зависимости от величины и длительности циклического нагружения: 1) $\sigma_a = 350$ МПа; 2) $\sigma_a = 400$ МПа; 3) $\sigma_a = 450$ МПа.

Из результатов, представленных на рис. 5, также следует, что степень влияния уровня амплитуды циклической нагрузки на триботехнические параметры стали 45 зависит от временного сечения, в котором ведется их сравнение. Приведенный выше анализ данных по рис. 3 касался числа циклов нагружения трибосопряжений, близких к усталостному разрушению образцов и показывал более высокую интенсивность изнашивания при низкой σ_a и низкую – при высоких σ_a . Если же выполнять подобное сравнение, например, при числах циклов нагружения до выхода кривой 3 (рис. 5) на пик и даже после некоторого спада, то можно видеть однозначно, что более высокие σ_a приводят к большему повышению интенсивности изнашивания, чем низкие. Эти результаты свидетельствуют о необходимости учета изменений интенсивности изнашивания в процессе работы трибосопряжений с целью обоснованного назначения их ресурса при наложении циклических нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика испытаний, позволяющая определить степень влияния циклического нагружения на интенсивность изнашивания материалов элементов трибосопряжения и диапазон напряжений, обеспечивающий нормальное механохимическое трение.

2. Установлено, что приложение циклической нагрузки на один из элементов трибосистемы приводит к увеличению интенсивности изнашивания и уменьшению диапазона контактных давлений, обеспечивающих условия нормального механохимического трения, по сравнению с испытанием только на трение. Это связано с повреждениями и ухудшением рельефа поверхности

трения в результате усталостных процессов в поверхностном слое материала, а также взаимодействием механизмов усталости и изнашивания при трении.

3. Уровень ухудшения триботехнических характеристик трущейся пары с наложением циклической нагрузки зависит как от ее уровня, так и от количества циклов нагружения: более высокие амплитуды напряжения ведут к более интенсивным ухудшениям характеристик в начальный период нагружения с достижением максимума и последующим их улучшением, в результате которого интенсивность изнашивания стали 45 перед усталостным разрушением образца становится ниже по сравнению с таковой при более низкой амплитуде напряжения.

4. Процессы взаимодействия повреждений в результате наложения усталости и изнашивания при трении приводят к снижению расчетных характеристик трибосопряжения для стали 45, что требует учета при оценке ресурса узлов трения.

1. Драйгор Д.А. Износостойкость и усталостная прочность стали в зависимости от условий обработки и процесса трения. – К.: Изд-во АН УССР, 1959. – 142 с.
2. Effect of sliding friction on the fatigue strength of a medium carbon steel / N.Yahata, T.Hirata, T.Kato, M.Watanabe // Wear. – 1988. – 121. – P. 197-209.
3. Носовский И.Г., Цыбанев Г.В., Белас О.Н. Влияние предварительного циклического нагружения на износостойкость стали 45 // Проблемы прочности, 1990, №4, с. 31-34.
4. Белас О.Н. Установка для исследования взаимного влияния трения и усталости // Проблемы трения и изнашивания, 1991, вып. 40, с. 54-57.
5. Белас О.М. Підхід до оцінки зношування пар тертя методом акустичної емісії // Фізико-хімічна механіка матеріалів, 2001, № 1, с. 89-90.
6. А.с. № 1577492 (СССР). Способ испытания пары трения / Носовский И.Г., Белас О.Н., Цыбанев Г.В. и др.
7. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – К.: Наукова думка, 1981. – 344 с.
8. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
9. Костецкий Б.И. Трение, износ и смазка в машинах. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
10. Лебедев Т.А., Маринец Т.К., Ефремов А.И. Исследование циклической прочности металлов методом записи диаграмм усталости // Усталость металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 97-105.
11. Сегал Я.С. Исследование закономерностей развития усталостных трещин методом регистрации прогиба образца // Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – С. 65-69.