

## Влияние величины и длительности циклического нагружения на триботехнические характеристики стали

Г. В. Цыбанев<sup>а</sup>, О. Н. Белас<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Секция прикладных проблем Президиума НАН Украины, Киев, Украина

*Проанализированы результаты исследования по оценке влияния циклической нагрузки на интенсивность изнашивания стали 45 при однонаправленном скольжении в контакте с контртелом из этой же стали. Показано, что наличие как низкого, так и высокого уровня циклической нагрузки по сравнению с пределом выносливости приводит к понижению триботехнических характеристик исследованной стали, что, по мнению авторов, обусловлено ухудшением условий скольжения в контакте вследствие 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.*

**Ключевые слова:** циклическое нагружение, усталость, триботехнические параметры, изнашивание, повреждение поверхностного слоя, нормальное трение, контактная нагрузка.

**Введение.** Надежность и долговечность машин обусловлены сохранением во времени объемной и поверхностной прочности материалов, подвергаемых влиянию нагрузок и среды. Процессы объемного разрушения протекают в результате накопления в материале дефектов его структуры, зарождения и распространения трещин, что приводит к макроскопическому разрушению детали или конструкции. Характер процессов поверхностного разрушения аналогичен, однако при наличии контакта и трения добавляется большое количество микроскопических актов разрушения, проявляющихся в постепенном уменьшении объема материала – износе.

Использование представлений и методов физики металлов позволило разработать теории пластичности, хрупкого и вязкого разрушений, усталости и ползучести, а также получить новые результаты в теории внутреннего трения, реологии. Недостаточная изученность физики поверхностной прочности материалов не позволяет обоснованно прогнозировать и трактовать процессы повреждения и разрушения в поверхностных слоях материалов. При наличии трения это объясняется следующими объективными причинами: принципиальные трудности выделения объекта разрушения и прямого наблюдения за ним; термодинамическая неравновесность протекающих процессов и необходимость рассмотрения и изучения их кинетики; влияние среды на всех этапах протекания процессов деформирования и разрушения.

Во многих случаях узлы трения машин и механизмов (коленчатые валы, оси, зубья шестерен и т.п.) работают при одновременном воздействии циклического объемного нагружения и поверхностного нагружения трением, что еще больше усложняет анализ процессов в поверхностном слое. Износо-

стойкость материала значительно зависит от прочности его поверхностного слоя. Характеристики сопротивления усталости материалов также существенно зависят от многих параметров поверхностного слоя. Таким образом, взаимодействие циклического нагружения и нагружения трением представляет интерес как с точки зрения оценки долговечности и критериев разрушения материалов, так и с позиций изучения механизмов взаимодействия указанных процессов, протекающих в поверхностном слое материала. При исследовании этого вопроса получено ограниченное количество экспериментальных результатов [1, 2]. Данные по влиянию циклического нагружения на износостойкость материалов практически отсутствуют. Предварительные исследования позволили выдвинуть гипотезу о существенном влиянии циклического нагружения на трибопроцессы [3], что необходимо учитывать при оценке ресурса трибосопряжений. В настоящей работе для экспериментальной проверки этой гипотезы и решения поставленных задач использовали электронную микроскопию и метод акустической эмиссии (АЭ) [4].

**Материалы и методика испытаний при усталости с наложением трения скольжения.** Испытания пары трения при действии на образец циклической нагрузки проводили на экспериментальной установке [5] 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. Объектом испытаний служил образец типа VIII по ГОСТ 25.502-79 с диаметром рабочей части 5 мм, изготовленный из стали 45 в нормализованном состоянии. Частота нагружения составляла 50 Гц. По результатам эксперимента были построены кривые усталости на базе  $10^6$  цикл и определен предел ограниченной выносливости  $\sigma_{-1}$ , который в масле МС-20 равен 315 МПа.

К образцу в зоне концентратора напряжений через контртело прикладывали нагрузку трением и фиксировали линейный износ. Контртела изготавливали из того же материала, что и образцы. Сопряжение исследуемой пары трения происходило по схеме 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 давлению  $P_k$  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 АЭ [4], позволяющая учитывать влияние циклического нагружения на интенсивность изнашивания материалов. В основу методики положен способ испытания пары трения [6], включающий операции сопряжения элементов пары трения, нагружения ее сжимающей силой, обеспечения относительного скольжения элементов пары трения с регистрацией сигналов АЭ, возникающей в контакте, и установлением зависимости интенсивности изнашивания  $J$  от акустико-эмиссионной информационной энтропии ( $H_{АЭ}$ ):

$$J = a + bH_{АЭ}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, зависящие от выбора материала элементов трибосистемы и схемы контакта.

Проводили аналогичные испытания пары трения, но к образцу одновременно прикладывали циклическую нагрузку, создающую амплитуду напряжения на поверхности образца величиной

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

где  $\sigma_y^u$  – циклический предел упругости;  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Выбор уровня амплитуды напряжения выше  $\sigma_y^u$  обусловлен предположением, что при  $\sigma_a < \sigma_y^u$  в материале накапливаются весьма малые повреждения в результате циклического нагружения, и их влияние на триботехнические характеристики является незначительным. За величину  $\sigma_y^u$  принят указанный выше ограниченный предел выносливости. Ограничение ( $\sigma_a < \sigma_T$ ) пределом текучести, определенным для статического нагружения, обусловлено отсутствием необходимости определения свойств материала пары трения, когда происходит потеря несущей способности материала, ввиду значительных остаточных деформаций, что недопустимо для реальных деталей. Регистрация параметров АЭ и использование установленной зависимости (1) позволяют 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.

Параметр  $I$  показывает долю прироста интенсивности изнашивания при наложении циклической нагрузки по сравнению с таковой, полученной 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, как интенсивность изнашивания  $J$  и критическое контактное давление  $P_{к,кр}$ . Последний параметр характеризует контактное давление в исследуемой паре, при котором происходит переход от нормального механохимического изнашивания к повреждаемости (схватывание, скол, питтинг) трущихся поверхностей и соответственно к резкому увеличению интенсивности изнашивания. На рис. 1 приведены зависимости интенсивности изнашивания от контактного давления, полученные при обычных испытаниях пары трения (кривая 1) и в условиях циклического нагружения (кривая 2).

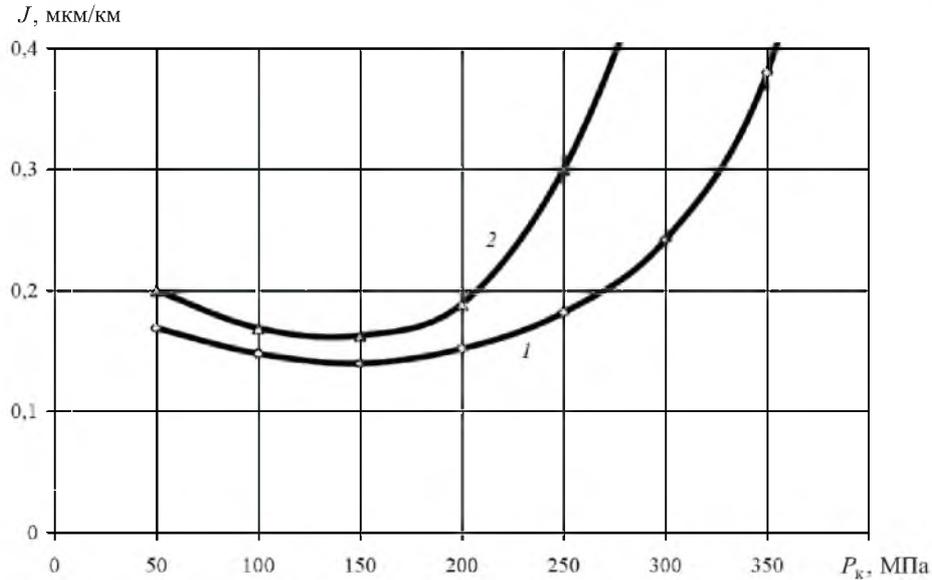


Рис. 1. Изменение интенсивности изнашивания  $J$  стали 45 в зависимости от контактного давления  $P_k$  в условиях граничной смазки маслом МС-20: 1 –  $\sigma_a = 0$ ; 2 –  $\sigma_a = 400$  МПа.

Как следует из приведенных данных, значения  $J^u = f(P_k)$ , полученные при тех же условиях трения, но при наличии циклических напряжений в образце, отличаются от значений  $J = f(P_k)$ , полученных при испытании материала только на трение и износ. Это обусловлено 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 изнашивание материала, что и отражается на регистрируемых в ходе работы пары трения параметрах АЭ, по которым определяли значение акустико-эмиссионной информационной энтропии ( $H_{АЭ}^u$ ). По параметрам зависимости  $J$  от  $H_{АЭ}$  устанавливали значение интенсивности изнашивания пары трения при действии циклической нагрузки.

Для анализа поверхностных эффектов в циклически нагружаемом образце трибосистемы использовали микрофотографии поверхности, выполненные методом электронной микроскопии (рис. 2). Видно, что при нормальном трении поверхности материалов элементов трибосопряжения имеют бездефектную структуру, хорошо выглаженную с мелкими царапинами по направлению скольжения (рис. 2,а). При нагружении образца циклической нагрузкой кроме отмеченных дефектов на поверхности трения обнаружены отдельные микротрещины различной величины, расположенные под разными углами к направлению скольжения (рис. 2,б). 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.

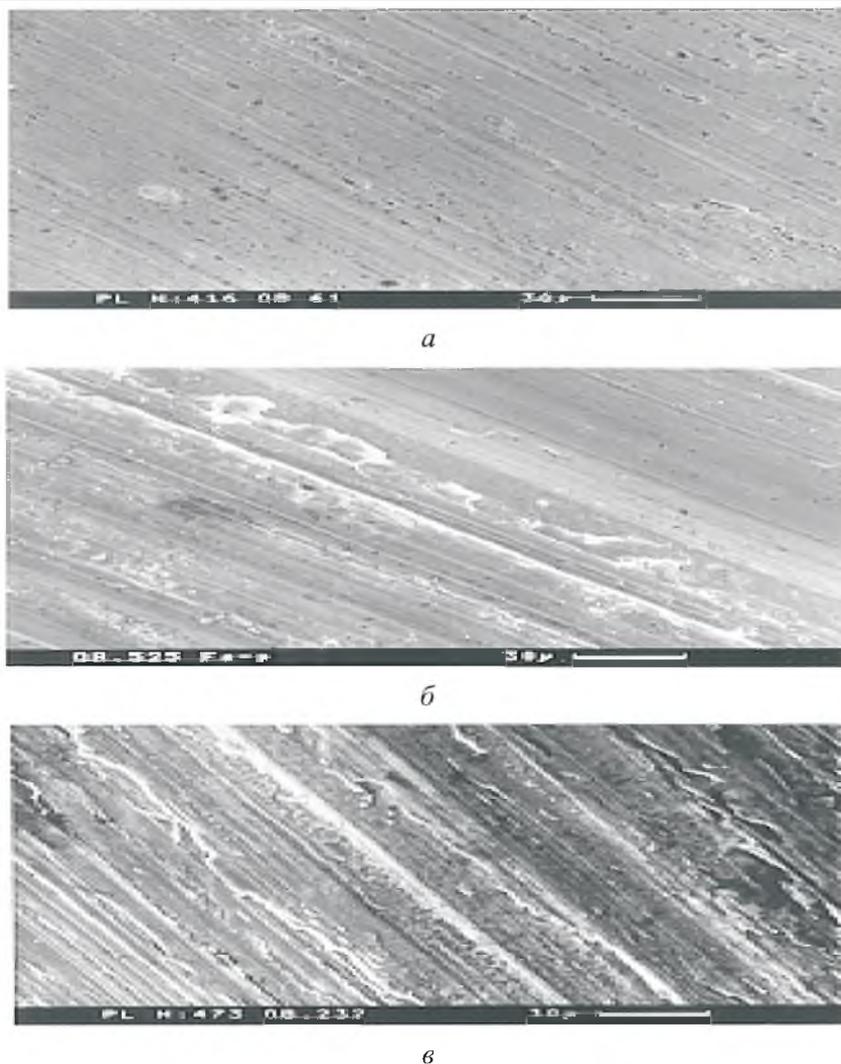


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей трения образцов из стали 45, испытанных в условиях граничной смазки маслом МС-20: *a* – нормальное изнашивание ( $\sigma_a = 0$ ,  $P_k = 150$  МПа); *б* – нормальное изнашивание при наложении циклической нагрузки ( $\sigma_a = 400$  МПа,  $P_k = 150$  МПа); *в* – повреждаемость при циклическом нагружении ( $\sigma_a = 400$  МПа,  $P_k = 250$  МПа); направление скольжения соответствует видимым линиям, являющимся следами скольжения контртела по образцу.

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

Таким образом, из рис. 1, 2 следует, что с увеличением контактного давления повышается износ элементов трибосопряжения, а при действии циклической нагрузки возрастает интенсивность изнашивания материала и ухудшается состояние поверхности трения. В последнем случае ярко выражено взаимное влияние процессов трения и усталости материалов. С повы-

шением контактного давления на узел трения происходит естественное увеличение 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  $\sim 1,4$  раза в условиях испытаний, приведенных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

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

Параметр	$\sigma_a$ , МПа	
	0	400
$J$ , мкм/км	0,140	0,163
$P_{k,кр}$ , МПа	360	250
$I$ , %	–	16,4
$\Gamma$ , ед.	–	1,44

При этом в качестве параметра оценки степени влияния циклического нагружения на изменение диапазона нормального трения использовали параметр  $\Gamma$ :

$$\Gamma = P_{k,кр} / P_{k,кр}^u, \quad (4)$$

где  $P_{k,кр}^u$  – критическое контактное давление при наложении усталости и трения.

Поскольку интенсивность усталостного повреждения материала и прежде всего поверхностного слоя изменяется в процессе циклического нагружения из-за прохождения различных стадий усталости, длительность которых зависит от амплитуды напряжения [7, 8], триботехнические характеристики материала будут зависеть также от величины и длительности приложения циклической нагрузки к узлу трения. Для выяснения этого вопроса дополнительно исследовали процесс изнашивания нормализованной стали 45 в широком диапазоне изменения контактных давлений и амплитудах циклических напряжений 350, 400 и 450 МПа, превышающих базовый ограниченный предел выносливости соответственно на 11, 27 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 тех же уровнях циклических напряжений.

На рис. 3 представлены результаты исследования интенсивности изнашивания в зависимости от контактной нагрузки при разной величине циклического нагружения. Можно установить общую закономерность влияния циклического нагружения на триботехнические характеристики испытанной

пары трения, которая заключается в существенном уменьшении диапазона нормального трения и повышении интенсивности изнашивания материала элементов трибосистемы при всех реализованных амплитудах напряжений. Однако следует обратить внимание на влияние величины циклической нагрузки на износостойкость стали 45.

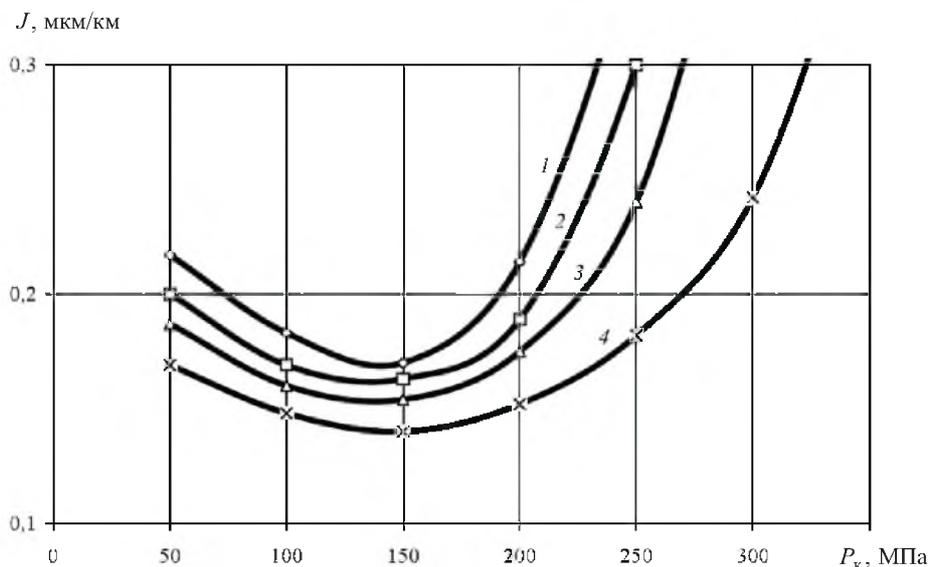


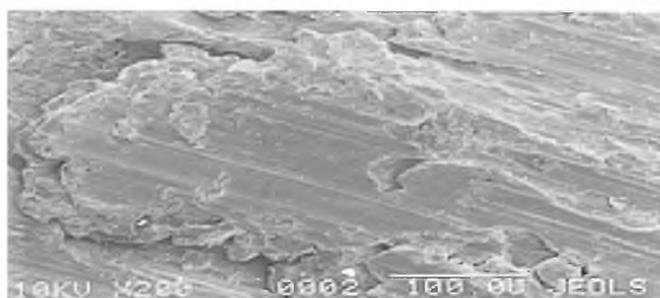
Рис. 3. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 в зависимости от контактной нагрузки и циклического нагружения в условиях граничной смазки маслом МС-20: 1 –  $\sigma_a = 350$  МПа; 2 –  $\sigma_a = 400$  МПа; 3 –  $\sigma_a = 450$  МПа; 4 –  $\sigma_a = 0$ .

Так, при циклическом нагружении одного из элементов трибосопряжения, создающем напряжения в материале, равные 350 МПа (на рис. 3 кривая 1), показания триботехнических характеристик наихудшие (табл. 2). По-видимому, это связано с тем, что при невысоком уровне циклических напряжений в материале ( $\sigma_a = 1,11\sigma_{-1} = 350$  МПа) для усталостного разрушения образца требуется большее количество циклов нагружения, т.е. интенсивность протекания усталостных процессов является сравнительно невысокой, и упрочнение поверхностных слоев [8] происходит в течение значительного промежутка времени, а следовательно, последующее разупрочнение и зарождение трещин усталости смещаются в область больших наработок [7]. Аналогичный вывод можно сделать относительно распространения усталостных трещин в объеме материала. Изменения, происходящие в поверхностных слоях материала, не могут не влиять на его износостойкость, что и было установлено выше. На стадии зарождения трещин на свободной поверхности в результате выхода устойчивых полос скольжения образуются интрузии и экструзии, формирующие рельеф поверхности, что в основном и приводит к увеличению износа материала. “Расшатывание” поверхностной структуры материала при действии циклической нагрузки способствует более раннему возникновению начальной повреждаемости поверхностей трения (рис. 4,а) и схватыванию элементов трибосистемы (на рис. 3 кривая 1).

Т а б л и ц а 2

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

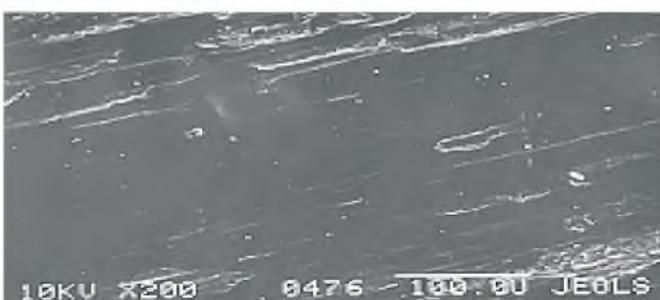
$\sigma_a$ , МПа	$P_{к.кр}$ , МПа	$J$ , мкм/км	$I$ , %	$\Gamma$ , ед.
0	360	0,140	–	–
350	220	0,170	2,14	1,64
400	250	0,163	1,64	1,44
450	280	0,154	1,00	1,29



а



б



в

Рис. 4. Микрофотографии поверхностей трения образцов из стали 45, испытанных в условиях граничной смазки маслом МС-20, при различном циклическом нагружении: а –  $\sigma_a = 350$  МПа; б –  $\sigma_a = 400$  МПа; в –  $\sigma_a = 450$  МПа. (Масштаб соответствует рис. 2; направление скольжения – следам в виде линий (дорожки трения).)

При напряжениях в материале 450 МПа (на рис. 3 кривая 3), что соответствует  $\sigma_a = 1,43\sigma_{-1}$ , процесс упрочнения поверхностных слоев происходит значительно интенсивнее, в результате чего повышается износостой-

кость стали 45, поскольку степень упрочнения поверхностных слоев с увеличением 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,б). 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 (на рис. 3 кривая 3).

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

Уместно отметить, что представленные зависимости (рис. 3) и микрофотографии поверхностей трения (рис. 4) получены при циклических нагрузках, составляющих ~90% долговечности, что приводит к описанным выше закономерностям изменения триботехнических параметров. Как будет показано ниже, при других значениях числа циклов нагружения  $n$  степень снижения указанных триботехнических характеристик будет находиться в ином соотношении с приложенными амплитудами напряжений.

Таким образом, износостойкость стали существенно изменяется в зависимости от уровня циклического нагружения. Процессы трения и изнашивания протекают при взаимодействии контактирующих поверхностей тел, поэтому состояние и структура поверхности оказывают решающее влияние на формирование сил трения и на механизмы изнашивания [9]. А поскольку 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.

Динамика изменения интенсивности изнашивания материалов элементов трибосопряжения при действии циклической нагрузки приведена на рис. 5. Анализ изменения значений интенсивности изнашивания в зависимости от циклической нагрузки свидетельствует об увеличении износа для любого уровня циклической нагрузки по сравнению со случаем ее отсутствия. Из рис. 5 хорошо видно деление кривых по характеру изменения в зависимости от величины циклической нагрузки, что позволяет косвенно отметить наличие периодов (кривые 2, 3), связанных с процессом усталостного разрушения материала [10, 11]. Так, при  $\sigma_a = 350$  МПа (на рис. 5 кривая 1) в процессе испытаний воздействие циклического нагружения на износ постоянно возрастает, хотя и незначительно, что обусловлено, как указывалось выше, относительно неинтенсивным протеканием усталостных процессов. Поэтому их вклад в процесс изнашивания материала с течением времени повышается (накапливаются повреждения), а прохождение периодов, наблюдаемых для кривых 2 и 3, менее заметно. С увеличением циклической нагрузки на образец пары трения (на рис. 5 кривые 2, 3) происходит изменение вида кривых. Общим для них является наличие рельефно определенных участков повышения и снижения значений интенсивности изнашивания. Первый участок, характеризующий повышение интенсивности изнашивания материала, обусловлен образованием интрузий

и экструзий вследствие выхода устойчивых полос скольжения, а также процессами, приводящими к ухудшению физико-механических свойств поверхностных слоев. При зарождении магистральной усталостной трещины происходит разгрузка поверхностных слоев, что частично выключает их из процесса усталостного разрушения. Поэтому наблюдается перелом кривых – переход к ниспадающему участку, поскольку трещина распространяется в основном по одному наиболее слабому сечению, тем самым не позволяя разупрочниться всему поверхностному слою. Низкие значения интенсивности изнашивания (на кривых 2, 3 крайние точки), т.е. повышение износостойкости материала, достигаются 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.

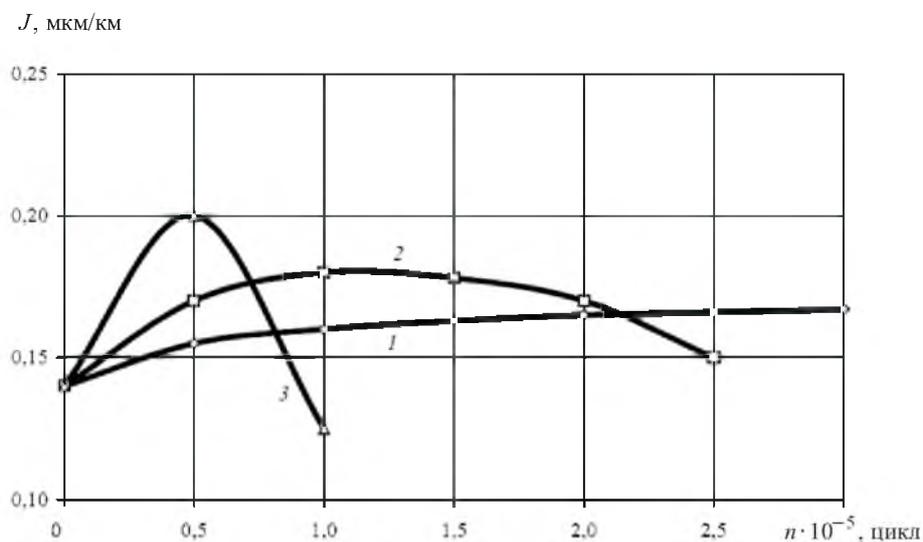


Рис. 5. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 в условиях граничной смазки маслом МС-20 в зависимости от величины и длительности циклического нагружения: 1 –  $\sigma_a = 350$  МПа; 2 –  $\sigma_a = 400$  МПа; 3 –  $\sigma_a = 450$  МПа.

Из рис. 5 также видно, что степень влияния уровня амплитуды циклической нагрузки на триботехнические характеристики стали 45 зависит от временного сечения, в котором проводится их сравнение. Представленный выше анализ данных рис. 3 осуществлялся для числа циклов нагружения трибосопряжений, близких к усталостному разрушению образцов. Установлено, что при низких значениях  $\sigma_a$  интенсивность изнашивания более высокая, при высоких  $\sigma_a$  – низкая. Если же выполнять аналогичное сравнение, например, при числах циклов нагружения до выхода кривой 3 (рис. 5) на пик и даже после некоторого спада, то видно, что более высокие значения  $\sigma_a$  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 циклическое нагружение одного из элементов трибосопряжения приводит к увеличению интенсивности изнашивания и уменьшению диапазона контактных давлений, обеспечивающих условия нормального механохимического трения по сравнению с испытанием только на трение.

3. Уровень ухудшения триботехнических характеристик пары трения с наложением циклической нагрузки зависит как от ее уровня, так и от количества циклов нагружения: при более высоких амплитудах напряжения наблюдается более интенсивное ухудшение указанных характеристик в начальный период нагружения с достижением максимума и последующим их улучшением, в результате чего интенсивность изнашивания материалов перед усталостным разрушением образца становится ниже по сравнению с таковой при более низкой амплитуде напряжения.

4. Процессы взаимовлияния повреждений при наложении усталости и изнашивании материалов приводят к снижению расчетных характеристик материала трибосопряжения, что требует учета их изменения в процессе работы при оценке ресурса узлов трения.

## Резюме

Проаналізовано результати дослідження щодо впливу циклічного навантаження на інтенсивність зношування сталі 45 при однонаправленому ковзанні в контакт з контртілом із цієї ж сталі. Показано, що наявність низького і високого рівня циклічного навантаження у порівнянні з границею витривалості приводить до зниження триботехнічних характеристик досліджуваної сталі, що, на думку авторів, зумовлене погіршенням умов ковзання в контактi внаслідок пошкодження від утомленості у поверхневому шарі. Періоди початкового зміцнення, зародження тріщини і її росту, що характерно для “чистої” втоми, мають місце також на залежностях інтенсивності зношування від числа циклів навантаження при накладенні втоми і тертя.

1. *Драйгор Д. А.* Износостойкость и усталостная прочность стали в зависимости от условий обработки и процесса трения. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – 142 с.
2. *Yahata N., Hirata T., Kato T., and Watanabe M.* Effect of sliding friction on the fatigue strength of a medium carbon steel // *Wear*. – 1988. – **121**. – P. 197 – 209.
3. *Носовский И. Г., Цыбанев Г. В., Белас О. Н.* Влияние предварительного циклического нагружения на износостойкость стали 45 // *Пробл. прочности*. – 1990. – № 4. – С. 31 – 34.

4. Белас О. М. Підхід до оцінки зношування пар тертя методом акустичної емісії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 1. – С. 89 – 90.
5. Белас О. Н. Установка для исследования взаимного влияния трения и усталости // Пробл. трения и изнашивания. – 1991. – Вып. 40. – С. 54 – 57.
6. А. с. 1577492 СССР, МКИ G01 N3/56. Способ испытания пары трения / И. Г. Носовский, О. Н. Белас, Г. В. Цыбанев и др. – Открытия. Изобретения. – 1990.
7. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. 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. – Киев: Техніка, 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.

Поступила 30. 07. 2003