

- твердым телом: материалы 10-й Междунар. конф., Минск, 24-27 сентября 2013г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; ред. кол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – С. 24–26.
- Гракович, П.Н. Лазерная абляция политетрафторэтилена / П.Н. Гракович [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 97–105.
 - Захаров, Л.А. Численное моделирование лазерной абляции металлов и полимеров при воздействии импульсами инфракрасного излучения: влияние начальной температуры образца / Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5, выпуск 1. – С. 37–47.
 - Булгаков, А.В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / А.В. Булгаков [и др.]. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.
 - Лещик, С.Д. Получение наночастиц лазерной абляцией твердых тел в жидкости в режиме наносекундных импульсов / С.Д. Лещик, К.Ф. Зноско, И.Г. Сергиенко, М.Ю. Серенко // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC – 2014, Москва, 1–5 декабря 2014 г. / Российская академия наук; ред. кол.: А.С. Сигов (отв. ред.) [и др.]. – Москва: МГТУ МИРЭА, 2014. – Ч. 2. – С. 84–87.
 - Лещик, С.Д. Получение наночастиц методом импульсной лазерной абляции политетрафторэтилена в жидкости и исследование их размерных характеристик / С.Д. Лещик, К.Ф. Зноско, П.И. Шупан, А.И. Волков // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы междунар. научно-техн. конф., Брест, 29–30 октября 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь; ред. кол.: А.В. Драган [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2014. – С. 153–155.
 - Игнатъева, Л.Н. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм / Л.Н. Игнатъева, В.М. Бузник // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 139–146.

Материал поступил в редакцию 15.12.14

LESHCHIK S.D., ZNOSKO K.F., KALUGIN Yu.K. Research of the particles generated by laser ablation of solid bodies in liquid

Particles obtained by laser ablation of graphite and polytetrafluoroethylene in water and ethanol were investigated. According to microscopy, the average particle size is 40–60 nm. By the method of Raman, IR and optical spectroscopy the composition of the particles was studied.

УДК 62.431

Кастрюк А.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ОБРАЗЦОВ С НАПЛАВЛЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Введение. При работе валы периодически нагружаются силами от давления газов и инерции от поступательно движущихся и вращающихся масс. Под действием циклических напряжений в материале детали зарождаются и постепенно развиваются трещины, из-за которых может произойти излом детали. Это разрушение опасно тем, что оно происходит под действием напряжений, намного меньших предела текучести. Более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения валов происходит в результате циклического нагружения [1, 2].

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях детали и затем развивается вглубь ее, образуя острый надрез. Распространение усталостной трещины обычно длительное, продолжающееся до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения достигнут разрушающих. Тогда происходит быстрое разрушение детали, как правило, хрупкое.

Работы И.А. Одина, В.В. Болотина, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, Е.К. Почтенного, Н.В. Олейника, Л.М. Школьника, В.Э. Завистовского и других исследователей большей частью посвящены развитию теории усталостной прочности изготовленных деталей. Модель механизма зарождения трещины в композиции «основа-покрытие» при циклическом нагружении предложена в работе [3], которая основана на предположении о том, что покрытие блокирует дислокации в поверхностном слое основного металла и стесняет развитие пластического деформирования. При нагружении источник дислокаций начинает их испускать. Граница «покрытие-основа» тормозит движение дислокаций, создавая локальные повышения их плотности. В микрообъеме материала, непосредственно прилегающем к границе, образуется скопление краевых дислокаций, причем они могут находиться на столь близком расстоянии друг от друга, что их экстраплоскости сливаются, вызывая появление растягивающих напряжений.

Если покрытие достаточно хрупкое, то растягивающие напряжения приводят к возникновению в покрытии микротрещин, распространяющихся в основной металл.

Согласно другим представлениям [4], появление трещин может

происходить непосредственно на наружной поверхности покрытия. Установлено, что даже на идеально гладких образцах при циклическом нагружении трещины появляются, прежде всего, на поверхности. Поверхность покрытия, обращенная к восстанавливаемой поверхности детали, играет роль источника трещин, так как на ней всегда имеются готовые концентраторы напряжений в виде пор, несплошностей, трещин, возникающих при напылении и наплавке. Имеются также рыхлые границы и между слоями и др.

Если покрытие наносит при высокой температуре, то в диффузионной зоне образуются фрагменты материала с повышенной плотностью дислокаций и вакансий. Перераспределение избыточных вакансий и их сток в определенных точках обуславливают появление микропор. Образующиеся в диффузионной зоне области растяжения и сжатия способствуют микропластическому деформированию основного металла и превращению микропор в трещину. Таким образом, нанесение покрытия в этом случае сопровождается повышением дефектности поверхностных слоев основного металла. Причем, чем больше упрочнено покрытие, т. е. чем больше оно склонно к хрупкому разрушению, тем опаснее становятся любые несплошности, поры и другие дефекты [4, 6].

Как правило, разрушение деталей машин происходит по нескольким одновременно или последовательно протекающим механизмам. Включение в работу того или иного механизма разрушения зависит от материала основы и покрытия, рабочей среды, режимов нагружения, схемы напряженно-деформационного состояния и др.

Основное условие сохранения и повышения усталостной прочности покрытий, нанесенных при восстановлении шеек валов, заключается в создании, как в наплавленном металле, так и в зоне термического влияния (ЗТВ) сжимающих напряжений. Существующие способы наплавки не обеспечивают выполнение этого условия, что приводит к снижению усталостной прочности валов, восстановленных с ее использованием, на 30–40 %. Отрицательное влияние на сопротивление усталости оказывают остаточные растягивающие напряжения, которые вызываются неоднородностью пластического

Кастрюк Александр Петрович, к.т.н., декан факультета машиностроения и автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Дудан Александр Витальевич, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Вигерина Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета. 211440, Беларусь, г. Новополоцк Витебской обл., ул. Блохина, 29.

деформирования, различием температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) основного и напавленного металлов, структурными превращениями в напавленном металле и ЗТВ. Результатом возникновения таких напряжений являются низкая прочность и малая пластичность слоя, образующегося при наплавке на границе основного и напавленного металлов.

Цель работы: проведение фрактографических исследований изломов напавленных образцов в условиях циклического нагружения для повышения их усталостной прочности.

Методика и оборудование. Для наплавки покрытий использовались проволоки, легированные такими карбидообразующими элементами, как бор, хром, титан ПП-Нп-80Х20Р3Т, Св-08Х13 с различным содержанием углерода и легирующих элементов. В результате наплавки мы получали износостойкие покрытия, имеющие эвтектидную структуру, в которой наблюдались избыточные фазы.

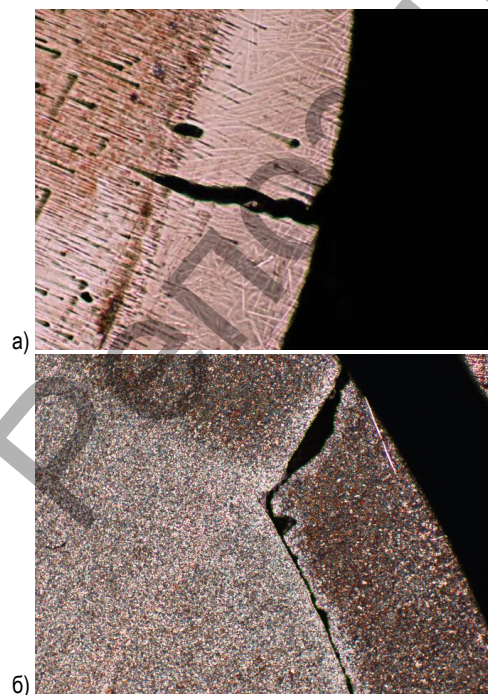
Для наплавки шеек образцов использовали установку, созданную на базе списанного станка модели 16К20. Защитные газы подавали из двух баллонов в смеситель, необходимое процентное соотношение газов регулировали изменением давления на их входе в смеситель. В качестве источника питания использовали выпрямитель ВС-300 с жесткой вольт-амперной характеристикой, полярность тока при наплавке – обратная.

Фрактографические исследования изломов напавленных образцов проводили при увеличении 8000–15000 крат с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1420, который формирует изображение объекта при сканировании его поверхности электронным зондом.

Фрактографические исследования проводили на изломах образцов, напавленных различными проволоками. Разрушение образцов происходило в условиях циклического нагружения, число циклов нагружения превышало 10^7 .

Трещины при наплавке образуются в результате неравномерного распределения температуры по сечению в сложных в конструктивном отношении деталях. Если напряжения, вызывающие пластическое деформирование, возникшие в результате значительного градиента температуры, достигнут значений, соизмеримых с пределом прочности, то в покрытии и ЗТВ неизбежно возникнут трещины. При наплавке покрытий в среде защитного газа, мы столкнулись с проблемами возникновения трещин на поверхности покрытия (рис. 1а) и его скалывания из-за непроплавления и отсутствия перемешивания нанесенного материала и материала восстанавливаемой детали (рис. 1б).

Дефекты возникли в результате необоснованного выбора режимов наплавки, поэтому оптимизации режима нанесения покрытий необходимо уделить особое внимание.



а) проволокой Св-08Х13; б) проволокой У7
Рис. 1. Трещины в напавленном покрытии

На механизм зарождения и развития усталостных трещин оказывает влияние множество факторов, влияние которых сложно прогнозировать. Существует несколько теорий, рассматривающих этот механизм, но ни одна из них не дает возможности объяснить всю совокупность явлений, наблюдающихся при разрушении металлов с покрытиями, а отражает лишь некоторую часть этих закономерностей. При нанесении покрытия возникают дополнительные факторы, такие как: микроструктура переходной зоны, ее размеры; микродюретрические характеристики покрытия и ЗТВ; распределение остаточных напряжений в покрытии и ЗТВ. Работы по изучению механизма зарождения и развития усталостных трещин на деталях с покрытиями проводились в основном для деталей, восстановленных напылением, а область исследования этого механизма при наплавке может быть расширена, поэтому необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований.

На изломах образцов с покрытием можно выделить следующие зоны (рис. 2): очаг разрушения, участок избирательного развития трещины и зону долома.



а) ПП-Нп-80Х20Р3Т; б) Св-08Х13; в) У7
Рис. 2. Поверхности усталостного излома образцов из стали 45, напавленных проволоками различных марок

В зависимости от материала наплавляемой проволоки каждая из зон имеет различные размеры. Максимальная площадь зоны долома наблюдается у образцов, наплавленных проволокой ПП-Нп-80Х20РЗТ (рис. 2а). Глубина проникновения усталостной трещины составляет 0,6–1,2 мм, что подтверждает преобладание хрупкого разрушения материала образца.

Излом образца, наплавленного проволокой Св-08Х13 (рис. 2б), имеет несколько очагов образования усталостных трещин, которые находятся в зоне сплавления материала покрытия и основы, что характерно для больших значений напряжений. Глубина проникновения усталостной трещины достигает 1,8–2,7 мм. По сравнению с образцом, излом которого приведен на рисунке 2 а, на образце, наплавленном проволокой Св-08Х13, преобладает ярко выраженная зона усталостного разрушения.

Излом образца, наплавленного проволокой У7 (рис. 2в), также имеет несколько очагов разрушения. Глубина проникновения усталостной трещины, по сравнению с другими образцами, наибольшая и достигает значений 1,8–6,0 мм.

На всех образцах, приведенных на рисунке 2, очаг зарождения усталостной трещины находится в переходной зоне, а трещина развивается вглубь образца, образуя острый надрез. Дальнейшее распространение усталостной трещины продолжается до тех пор, пока уменьшающееся сечение детали окажется с такими размерами, что действующие в нем напряжения достигнут предела прочности, тогда происходит быстрое хрупкое разрушение, которое особенно хорошо прослеживается на образце, изображенном на рисунке 2а. Изломы образцов на рисунках 2б и 2в имеют сходное строение с преобладанием зоны ярко выраженного усталостного разрушения.

На изломах всех образцов заметны две зоны: первая мелкозернистая, которая может принимать фарфоровидный вид, а иногда и блестящий гладкий вид, и вторая – с волокнистым строением. Первая – зона усталостного разрушения, которая развивается постепенно. Скорость ее развития зависит от значений нагрузки. При большой нагрузке первая зона быстро переходит во вторую – зону статического разрушения. Вторая зона образуется в течение одного или нескольких циклов нагрузки. На поверхности изломов образцов можно наблюдать специфические полосы – следы фронта усталостной трещины. Относительно причин возникновения усталостных полос на изломах существуют различные точки зрения. Полагают, что усталостные полосы образуются вследствие пауз в нагружении (периодов отдыха) при небольшом пластическом течении материала в устье трещины. Образование таких полос связывали также с влиянием пластического деформирования в устье трещины при высоких нагрузках. Согласно другим представлениям, усталостные полосы образуются вследствие упрочнения дна трещины при работе детали, как при пониженных, так и при повышенных напряжениях. При этом предполагается, что на пути продвижения трещины создается упрочненный слой металла, разрушение которого сопровождается образованием усталостных полос. Также выдвигалось предположение о том, что одной из причин образования усталостных полос является преодоление трещиной прочных препятствий. В настоящее время не сложилось единого мнения о природе образования усталостных полос. На исследуемых образцах мы наблюдали наличие усталостных полос (рис. 3), которые явились границей раздела между участками с различной рельефом микронеровностей и изменением рельефа поверхности образца. С нашей точки зрения, наиболее вероятной причиной возникновения усталостных полос при работе детали является преодоление трещиной прочных препятствий, в роли которых выступают упрочненные участки дна трещины.

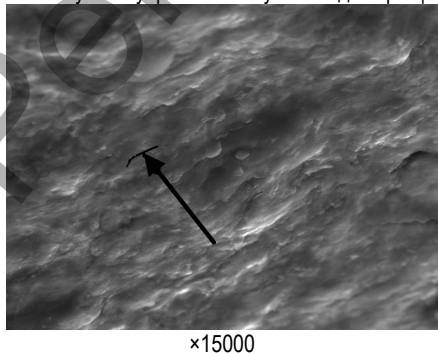


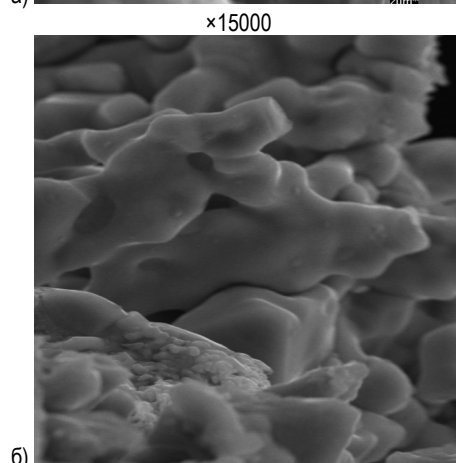
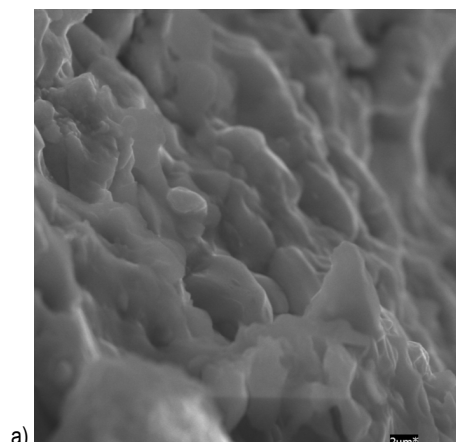
Рис. 3. Усталостные полосы на изломах образцов, наплавленных проволокой Св-08Х13 (направление распространения трещины указано стрелкой)

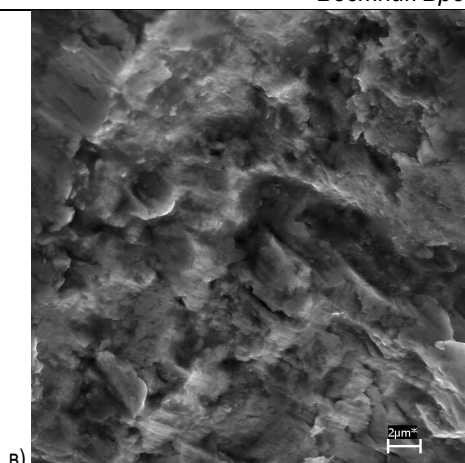
На изломах всех образцов зона усталостного разрушения превышает зону статического разрушения, что подтверждает усталостный характер излома. На строение усталостных изломов влияют следующие основные факторы [5–7]:

- вид нагружения в процессе зарождения и развития усталостной трещины;
 - сопротивление разрушению детали, определяемое ее геометрической формой, свойствами металла и состоянием поверхности;
 - воздействие внешней среды.
- Исходя из наблюдений микростроения полученных изломов, можно выделить следующие виды разрушения:
- ямочный разрыв в результате возникновения, роста и слияния микропор, а также разновидность его – серпантинное скольжение и вытягивание;
 - внутрикристаллический скол и его разновидность – квазиотрыв, проскальзывание по границам зерен или фаз;
 - усталостный излом.

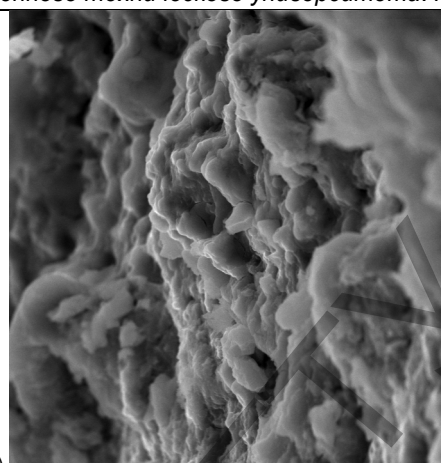
Разрушение по механизму слияния микропор предусматривает участие локального пластического деформирования. Наличие на фрактограммах ямочного рельефа после разрушения образцов (рис. 4в) можно связать с вязким пластическим разрушением. Точнее сказать, ямочный рельеф является проявлением определенного механизма разрушения, а не признаком пластичности. Разрушение по механизму ямочного разрыва наблюдается при различных видах нагружения: однократном циклическом и длительном статическом, на первой стадии усталостного.

Типично хрупким является разрушение по механизму внутрикристаллического скола. Разрушения наплавленных образцов происходят по механизму квазиотрыва с некоторой степенью пластического деформирования (рис. 4а, 4б). Механизм усталостного разрушения еще недостаточно объяснен, но из-за локальности пластического деформирования и разрушения, усталость можно отнести к особому виду хрупких разрушений.





в) $\times 15000$



б) $\times 15000$

а) покрытие; б) переходная зона; в) основа

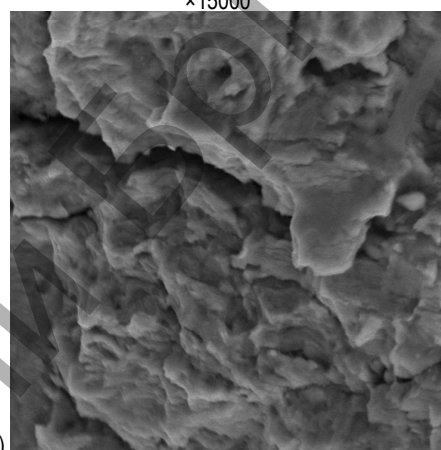
Рис. 4. Характер усталостного микрорельефа разрушения образца, наплавленного проволокой Св-08Х13

Тем не менее, наиболее характерным механизмом образования пластичного излома является образование трещин из отдельных микропор, которые в процессе развития объединяются в одну трещину.

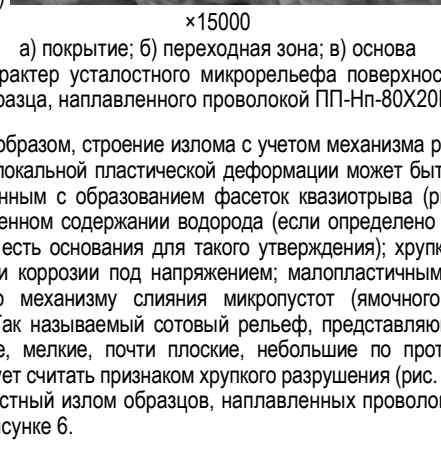
Присущая изломам неоднородность при их исследовании выражается в том, что практически во всех случаях наблюдается чередование микроучастков с различной степенью пластического разрушения с наличием участков полностью хрупкого разрушения. В ряде случаев могут чередоваться микроучастки внутри- и межзеренного разрушения.

Изучение характера излома наплавленных образцов привело к выводу, что на поверхности излома в зависимости от амплитуды напряжений можно выделить зоны: зону усталостного разрушения (см. рис. 4а), переходную зону, характеризующаяся признаками смешанного разрушения, в которой наблюдается ямочное разрушение и зону долома (см. рис. 4в), имеющую более гладкий вид – волнообразный рельеф. Переходная зона образуется под действием касательных напряжений при расщеплении по плоскостям скольжения, подготовленными предшествующей деформацией, а размер зоны соответствует области локального деформирования в вершине трещины, образующейся при нагружении перед ее страгиванием.

Излом образцов, наплавленных проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т, характеризуется переходом от внутризеренного к межзеренному разрушению и сопровождается уменьшением пластичности материала. Вследствие этого отмечается такая особенность данных разрушений, как хрупкий характер изломов (рис. 5). Некоторые особенности, присущие хрупким изломам однократного нагружения, характерны также и для изломов многократного нагружения.



б) $\times 15000$

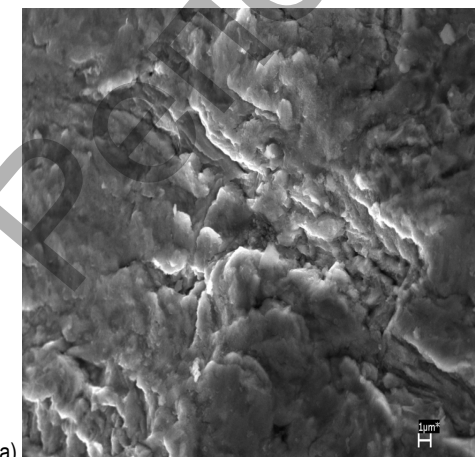


а) покрытие; б) переходная зона; в) основа

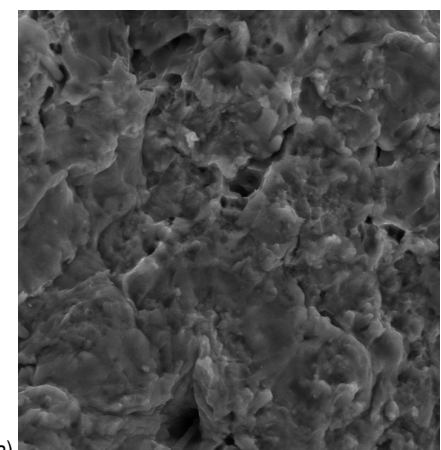
Рис. 5. Характер усталостного микрорельефа поверхности излома образца, наплавленного проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т

Таким образом, строение излома с учетом механизма разрушения и степени локальной пластической деформации может быть: хрупким внутризеренным с образованием фасеток квазиотрыва (рис. 5б, 5в) при повышенном содержании водорода (если определено его содержание или есть основания для такого утверждения); хрупким межзеренным при коррозии под напряжением; малопластичным внутризеренным по механизму слияния микропустот (ямочного разрыва) (рис. 5а). Так называемый сотовый рельеф, представляющий собой равноосные, мелкие, почти плоские, небольшие по протяженности ямки, следует считать признаком хрупкого разрушения (рис. 5б, 5в).

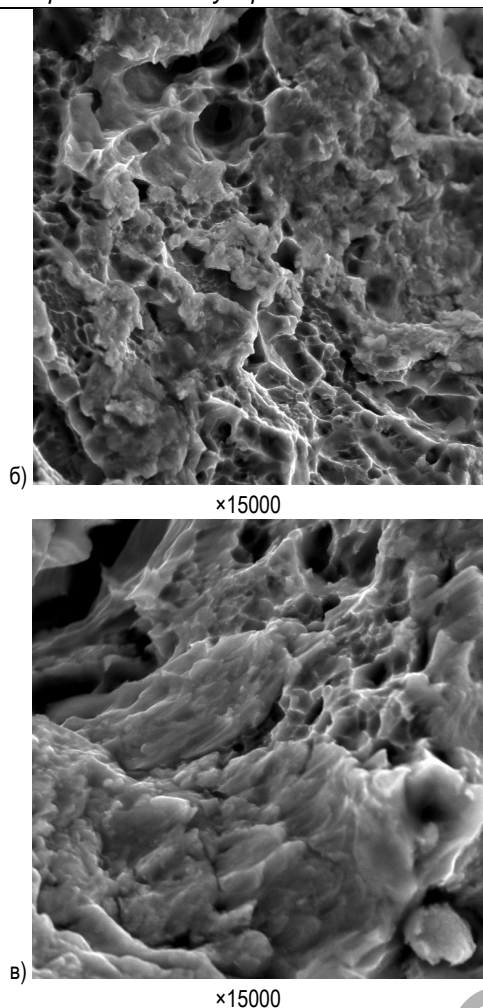
Усталостный излом образцов, наплавленных проволокой У7, показан на рисунке 6.



а) $\times 15000$



а) $\times 15000$



а) покрытие; б) переходная зона; в) основа
Рис. 6. Характер усталостного микрорельефа поверхности излома образца, наплавленного проволокой У7

На фрактограмме основы преобладает ямочный рельеф разрушения (рис. 6в), что можно связать с вязким пластичным разрушением (изломом), который преобладает в зоне разрушения основного металла. Но даже при преимущественном наличии хрупких фасеток отрыва (рис. 6б) разрушение имеет смешанный характер.

Так, в наплавленных образцах, часто разрушение в микрообъеме начинается хрупко с образованием фасеток отрыва или квазиотрыва (рисунок 6 б и в), а затем продолжается по механизму ямочного разрыва (рис. 6а). Края или боковые поверхности трещин имеют вид ямочного разрушения (рис. 7).

Полученные данные подтверждают, что усталостные трещины зарождаются в переходной зоне и на их краях можно заметить следы участков с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения.

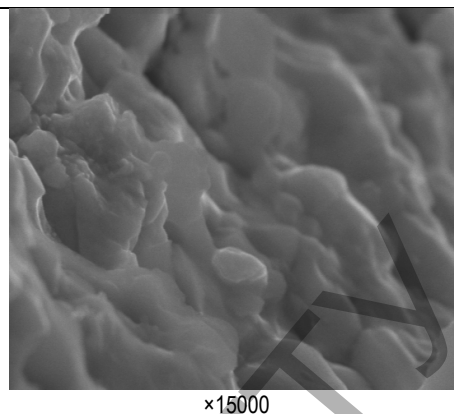


Рис. 7. Поверхность трещины, зародившейся в переходной зоне, при усталостных испытаниях образца, наплавленного проволокой Св-08Х13

Заключение. Фрактографические исследования изломов наплавленных образцов показывают, что при разрушении основы преобладает ямочный рельеф. На образцах, наплавленных проволоками Св-08Х13 и У7, даже при наличии хрупких фасеток разрушение имеет смешанный характер. Изломы образцов, наплавленных проволокой ПП-Нр-80Х20Р3Т, имеют сотовый рельеф, что является признаком хрупкого разрушения. Можно отметить, что на всех образцах излом переходной зоны имеет смешанный (вязко-хрупкий) или хрупкий характер, на фрактограмме основы преобладает ямочный рельеф, что связано с вязким пластичным разрушением. На изломах всех образцов, наплавленных различными материалами, источником зарождения усталостных трещин являлась переходная зона. Усталостные трещины зарождаются в переходной зоне и их края имеют следы участков с усталостными бороздками и фасетками межзеренного разрушения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Почтенный, Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций / Е.К. Почтенный. – Минск: УП «Арти-Фекс», 2002. – 182 с.
2. Трощенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
3. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 144 с.
4. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 460 с.
5. Гордеева, Т.А. Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т.А. Гордеева, И.П. Жегина. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
6. Иванова, В.С. Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
7. Горицкий, В.М. Диагностика металлов / В.М. Горицкий. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.

Материал поступил в редакцию 30.12.14

KASTRYUK A.P., DUDAN A.V., VIGERINA T.V. Fraktograficheskiye of research of breaks of the samples with the built-up coverings received in the conditions of cyclic loading

Fraktografichesky researches of breaks of the samples received by a naplavky wire with various maintenance of the alloying elements and carbon are given in work. Destruction of samples happened in the conditions of cyclic loading. It is established that at destruction of a basis of a sample the patching relief prevails. On the samples which are built up by provoloka of Sv-08X13 and U7, destruction has the mixed character. Breaks of the samples which are built up by wire PP-Np-80kh20r3t have a cellular relief that is a sign of fragile destruction. On breaks of all samples which are built up by various materials, a source of origin of fatigue cracks was the transitional zone.