

УДК 669.15-194:621.771-413

РАЗРУШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ АРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

А.Б. Максимов, к.т.н., доцент

Государственный морской технологический университет (Керчь, Россия)

Аннотация. Рассмотрено разрушение термически армированной стали Ст3сп при одноосном растяжении. Исследовано влияние угла встречи трещины с границей раздела областей в металле с различной микроструктурой. Показано, что при движении трещины из структуры менее прочной в более прочную при углах встречи от 0 до 45° трещина изменяет свое направление и распространяется по границе раздела. При дальнейшем увеличении угла встречи трещина пересекает границу и распространяется практически по прежней траектории. Максимальное отклонение трещины на границе раздела двух структур достигается при угле 45°.

Ключевые слова: термическое армирование стали, избирательное охлаждение, разрушение, напряженное состояние, граница раздела структур, угол встречи.

E-MAIL: aleksandrmks@yandex.ru

Управление процессом разрушения металла позволяет минимизировать негативные последствия. Ранее было показано, что если на пути трещины встречается упрочненная макроскопическая область, то происходит отклонение трещины от первоначального направления [1]. В экспериментах на моделях из неоднородного материала установлено, что наклонные границы раздела структурных неоднородностей изменяют траекторию движения трещины [2].

Наличие макроскопических областей с различной микроструктурой реализовано в термически армированном листе из углеродистых и низколегированных сталей [3]. Области с различной микроструктурой получают путем избирательного ускоренного охлаждения нагретого листа до температуры 900 – 950 °С (после горячей прокатки или отдельного нагрева). Возможен также избирательный нагрев областей листа до температуры 900 – 950 °С с последующим ускоренным охлаждением.

Целью настоящей работы было определение оптимального угла наклона границы раздела двух различных микроструктур в стали, при котором обеспечивается наибольшее отклонение трещины от своего первоначального направления.

В качестве материала исследования использовали листовую прокат толщиной 2 мм из стали Ст3сп. Форма

и размер исследуемых образцов представлены на рис. 1. Образцы нагревали до температуры 880 – 900 °С, затем охлаждали путем частичного погружения в 7 %-ный водный раствор поваренной соли (линия погружения I на образце показана пунктиром на рис. 1). Линия погружения в водный раствор составляла с вертикальной осью образца II угол α , который принимал значения 20, 30, 45, 60 и 90°.

В результате термической обработки ускоренно охлажденная область образца имеет мелкозернистую феррито-перлитную структуру, нормализованная часть образца – менее дисперсную феррито-перлитную структуру.

Линия I, разделяющая две области металла с разными микроструктурами, называется границей раздела структур.

Термообработанные образцы испытывали на растяжение на испытательной машине ГМС-20. На рис. 1 показано направление приложения растягивающей нагрузки.

При такой схеме нагружения трещина должна распространяться от надреза вдоль линии II. Острый угол α , образованный первичным направлением траектории движения трещины и границей раздела структур, называется углом встречи.

Распределение твердости вдоль вертикальной осевой линии образца показано на рис. 2. На границе раз-

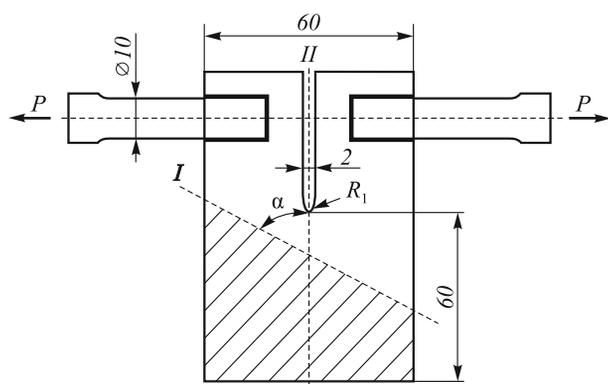


Рис. 1. Образец для внецентренного растяжения

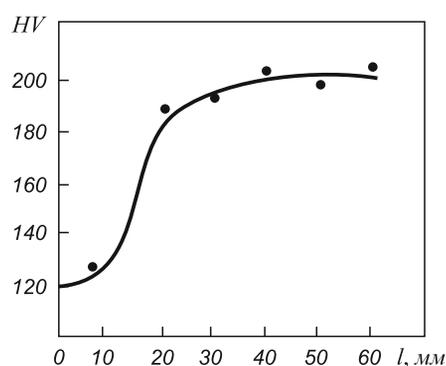


Рис. 2. Распределение твердости стали Ст3сп в зависимости от расстояния до границы раздела структур



Рис. 3. Разрушенные образцы после испытания:
 $a - \alpha = 90^\circ$; $б - \alpha = 20^\circ$; $в - \alpha = 30^\circ$; $г - \alpha = 45^\circ$

дела областей с различной микроструктурой происходит резкое повышение твердости (порядка 80 HV).

При испытании образцов с однородной структурой (после нормализации или ускоренного охлаждения) трещина при разрушении распространяется вдоль осевой линии *II* (см. рис. 2), т.е. перпендикулярно приложенной внешней нагрузки *P*.

Фотографии разрушенных образцов с неоднородной структурой при испытании на растяжение представлены на рис. 3. Граница раздела структур на образцах выглядит светлой линией (на образце она отмечалась мелом). Без отклонения трещина распространяется, если подходит к границе раздела структур нормально (угол $\alpha = 90^\circ$) или когда распространяется вдоль (угол $\alpha = 0^\circ$). С увеличением угла α до 45° трещина распространяется по границе раздела структур, вследствие этого происходит отклонение траектории движения трещины от своего первоначального направления.

Характеристикой интенсивности отклонения трещины от своего первоначального направления принят коэффициент *K*, который определяется по формуле

$$K = a/b, \quad (1)$$

где *a* – соответствующее отклонение от базы; *b* – перемещение трещины вдоль осевой линии *II* (базы) (рис. 4).

Изменение коэффициента *K* в зависимости от угла наклона границы раздела двух структур при базе $b = 30$ мм показано ниже:

$\alpha, ^\circ$	0	20	30	45	60	90
<i>K</i>	0	0,37	0,70	1,00	0,10	0

Анализ полученных данных показывает, что при углах встречи распространяющейся трещины с границей раздела структур от 0 до 45° трещина изменяет траекторию своего движения и распространяется вдоль границы раздела.

Максимальное отклонение трещины от своего первоначального направления достигается при угле встречи $\alpha = 45^\circ$ и составляет $K = 1$. При дальнейшем увеличении угла встречи (до 90°) трещина пересекает границу раздела. Величина отклонения трещины уменьшается и не превышает значения $K = 0,1$. В угловом выражении это составляет порядка 10° , что согласуется с экспериментами на моделях [2].

Таким образом результаты, полученные на бумажных моделях, полностью согласуются с результатами испытания на стальных образцах. Это свидетельствует о правомочности моделирования распространения трещины на бумажных моделях.

Из литературных данных известно [4], что повышение дисперсности феррито-перлитной структуры приводит к повышению ударной вязкости стали. Работа зарождения трещины определяется исходным состоянием стали и мало зависит от термической обработки. Работа распространения трещины существенно зависит от термической обработки и увеличение дисперсности микроструктуры приводит к ее возрастанию.

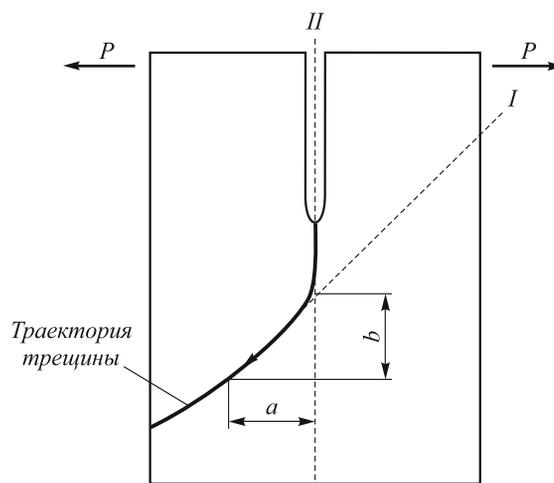


Рис. 4. К определению коэффициента интенсивности отклонения трещины

В рассмотренном эксперименте трещина зарождается и начинает распространяться в структуре с меньшей работой распространения и подходит к структуре с большей работой распространения. Из энергетических условий следует, что трещина должна распространяться по границе раздела структур. Это действительно наблюдается до наклона границы структур (угла встречи) 45° к первоначальному распространению трещины. При дальнейшем увеличении угла встречи трещина пересекает границу раздела структур и распространяется в структуре с большей работой распространения.

При одноосном растяжении наибольшие касательные напряжения действуют в площадках, расположенных под углом 45° к оси растяжения [5].

Поэтому, если наклонная граница двух структур находится под углом 45° к направлению действия растягивающих усилий, то в плоскости границы раздела действуют наибольшие касательные напряжения. Действие касательных напряжений приводит к вязкому разрушению (срезом). Для образца с однородной структурой разрушение происходит перпендикулярно растягивающим усилиям (отрывом), т.е. от нормальных напряжений и поэтому имеет хрупкий характер.

Вследствие этого, увеличение угла наклона границы раздела структур до 45° приводит к возрастанию касательных и уменьшению нормальных напряжений. При этом характер разрушения переходит от хрупкого к вязкому. Максимальный эффект наблюдается при угле наклона границы раздела, равному 45° . Дальнейшее его увеличение приводит к возрастанию нормальных напряжений и уменьшению касательных напряжений, т.е. разрушение становится опять хрупким. Хрупкое разрушение связано с меньшей работой распространения трещины.

Выводы. Представленные экспериментальные данные свидетельствуют, что граница раздела двух микроструктур в стали может изменить направление движения трещины. При углах наклона границы раздела к направлению распространения трещины от 0 до 45° она меняет свое направление и распространяется по границе. Наиболее эффективное отклонение трещины от своего первоначального направления наблюдается при наклоне границы раздела структур порядка 45° . При дальнейшем увеличении угла встречи трещина пересекает границу раздела и ее отклонение значительно уменьшается (не более 10°).

На основании полученных результатов разработан способ упрочнения листового проката [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов А.Б. // Вопросы материаловедения. 2010. № 3. С. 40 – 44.
2. Максимов А.Б. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 7. С. 53 – 56.
3. А.с. 1452846 СССР. Способ упрочнения листового проката / Ф.Е. Долженков, В.П. Следнев, М.С. Подгайский и др. Бюл. № 3. 1989.
4. Подгайский М.С., Максимов А.Б. Влияние циклической деформации знакопеременным изгибом на механические свойства низколегированных сталей в зависимости от исходного структурного состояния // Термическая и термомеханическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1981. С. 25 – 27.
5. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопrotивление материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 654 с.
6. Пат. 63929 Украины. Способ упрочнения листового проката / Максимов А.Б. Опубл. 25.10.2011. Бюл. № 20.

© 2014 г. А. Б. Максимов
Поступила 11 марта 2014 г.

DESTRUCTION OF THE THERMALLY REINFORCED STEEL

A.B. Maximov, Cand. Eng., Assist. professor

State Marine University of Technology (Kerch, Crimea, Russia)

E-MAIL: aleksandrmks@yandex.ru

Abstract. Destruction of the thermally reinforced steel St3sp is considered at monaxonic tension. Influence of corner of meeting of crack is investigational with the border of division of areas in a metal with a different microstructure. It is shown that at crack movement from structure of less strong in stronger at meeting corners from 0 to the 45° th crack changes the direction and extends on limit of the section. At the further increase of corner of meeting a crack crosses a border and spreads practically on a former trajectory. The maximal rejection of crack on the border of division of two structures is arrived at coal 45° .

Keywords: thermal steel reinforcement, electrol cooling, destruction, tense state, border of division of structures, corner of meeting.

REFERENCES

1. Maksimov A.B. *Voprosy materialovedenija*. 2010. № 3(63) P. 40 – 44.
2. Maksimov A.B. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija*. 2013. № 7. Pp. 53 – 56.
3. Dolzhenkov F.E., Slednev V.P., Podgajskij M.S. etc. *Sposob uprochnenija listovogo prokata* (Method of reinforcing of steel rolled products). Certificate of authorship USSR № 1452846, MKI3 kl. S21D1/02. № 4149310.
4. Podgajskij M.S., Maksimov A.B. *Termicheskaja i termomechanicheskaja obrabotka prokata* (Thermal and thermomechanical processing of rolled products). Moscow: Metallurgija. 1981. Pp. 25 – 27.
5. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Moscow: Vysshaja shkola, 1989. 654 p.
6. Maksimov A.B. *Sposob uprochnenija listovogo prokata* (Method of reinforcing of steel rolled products). Patent of Ukraine № 63929.2011

Received March 11, 2014