

КИНЕТИКА И МИКРОМЕХАНИКА ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ

¹Шиховцов А.А., ²Мишин В.М.

¹ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Ставрополь, e-mail: alexey.shikhovtsov@mail.ru;

²ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Пятигорск, e-mail: mishinvm@yandex.ru

Целью работы являлась разработка кинетической модели прочности, описывающей переход от микро-механизма замедленного разрушения к микромеханизму скола мартенситной стали, учитывающей уровень остаточных микронапряжений, скорость нагружения и температуру испытаний. Изучение влияния температуры испытаний и скорости нагружения на склонность к замедленному разрушению закаленной стали проводили сосредоточенным изгибом при различных скоростях движения траверсы испытательной машины. Приложенную нагрузку пересчитывали в максимальные локальные растягивающие напряжения с помощью метода конечных элементов. Строили кривые замедленного хрупкого разрушения. Было установлено, что условия перехода от термически активированного механизма при замедленном разрушении к силовому для локального разрушения закаленной стали могут быть описаны критериальным выражением, состоящим из суммы активационной и силовой компонент, равных характеристике сопротивления стали локальному разрушению (сколу). Также предложена кинетическая модель прочности стали, описывающая переход от микро-механизма замедленного разрушения к микромеханизму разрушения сколом, учитывающая остаточные микронапряжения, скорость нагружения и температуру испытаний.

Ключевые слова: напряжение, замедленное разрушение, кинетика разрушения, закаленная сталь, локальное напряжение, остаточные микронапряжения

STEEL DELAYED FRACTURE KINETICS AND MICROMECHANICS

¹Shikhovtsov A.A., ²Mishin V.M.

¹North-Caucasus Federal University, Stavropol, e-mail: alexey.shikhovtsov@mail.ru;

²North-Caucasus Federal University, Pjatigorsk, e-mail: mishinvm@yandex.ru

The purpose of the work is to develop a kinetic strength model, which describes the transition from delayed fracture micromechanism to cleavage martensitic steel micromechanism, which takes into account the level of residual microstrain, loading speed and temperature tests. Study test temperature and loading rate influence on the delayed fracture tendency of hardened steel was carried focused bend at different speeds beam testing machine. Applied load were converted into the local maximum tensile stress using the finite element method. It was found that the conditions of the transition from a thermally activated mechanism of delayed fracture to the power for local destruction of hardened steel can be described criterial expression consisting of the sum of the activation and force component equal to the characteristic impedance are local fracture (cleavage). A kinetic model is also the strength of steel, which describes the transition from micromechanism delayed fracture to cleavage fracture micromechanisms, taking into account the residual microstresses, loading rate and temperature tests.

Keywords: strength, delayed fracture, destruction kinetics, hardened steels, local stresses, residual microstresses

Одной из общих закономерностей разрушения твердых тел является существование временной зависимости прочности [1]. При замедленном разрушении стали зарождение и развитие трещины являются термически активированными процессами [1–3]. Сталь, в которой присутствуют остаточные внутренние микронапряжения, например, обладает запасом неравномерно распределенной по объему упругой энергии с ними связанной, даже без приложения внешней нагрузки. Полагали, что остаточные микронапряжения в локальных областях перед вершинами кристаллов мартенсита могут понижать энергию, необходимую для достижения энергетического барьера разрыва атомных связей [6, 7].

Целью работы являлась разработка кинетической модели прочности, описывающей переход от микромеханизма замедленного разрушения к микромеханизму скола

мартенситной стали, учитывающей уровень остаточных микронапряжений, скорость нагружения и температуру испытаний.

Кинетика термофлуктуационного замедленного разрушения закаленной стали

Основная формула (1) кинетической теории [1]:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{Q}{KT} \quad (1)$$

устанавливает связь времени до разрушения τ с энергией активации Q , где τ_0 – предэкспоненциальный множитель, зависящий от частоты попыток преодоления потенциального барьера, количества мест активации и их характеристик; K – постоянная Больцмана; T – температура. Разрушение связывают с накоплением разрывов атомных связей в результате термофлуктуационных колебаний атомов [1].

Согласно кинетической теории прочности для полимерных материалов [1] время до разрушения при действии напряжения определяется формулой (2):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{KT}, \quad (2)$$

где U_0 – энергетический барьер; γ – активационный объем; σ – напряжение в зоне разрушения.

Эта модель предполагает аддитивность напряжений разной природы в материале независимо от причин их вызвавших. Для случая неравномерного распределения локальных напряжений в образце с надрезом [2] в выражение (2) необходимо подставить значение максимального локального растягивающего напряжения σ_{11max} (3):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma_{11max}}{KT}. \quad (3)$$

Энергия активации в случае отсутствия остаточных внутренних микронапряжений (4) зависит от величины напряжений, вызванных приложением нагрузки извне:

$$Q = U_0 - \gamma \cdot \sigma_{11max}. \quad (4)$$

Однако наличие в мартенситной стали локальных остаточных внутренних микронапряжений приводит к появлению локальных областей в вершинах мартенситных кристаллов с повышенной потенциальной энергией [2, 3, 6]. В этом случае, энергия активации равна разности энергии барьера и потенциальной энергии активационного объема (5):

$$Q = U_0 - \gamma \cdot (\sigma_{11max} + \sigma_{вн}). \quad (5)$$

Время до зарождения трещины в закаленной стали при одновременном воздействии остаточных внутренних микронапряжений $\sigma_{вн}$ и действии σ_{11max} соответственно равно (6):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma(\sigma_{11max} + \sigma_{вн})}{KT}. \quad (6)$$

Энергия барьера U_0 может быть оценена как (7):

$$U_0 = \gamma \cdot \sigma_F. \quad (7)$$

Тогда время до зарождения трещины в стали с остаточными микронапряжениями может быть определено по формулам (8), (9) с учетом параметров кинетической теории

$$Q = U_0 - (U_0 - \gamma \cdot \sigma_{11max}^0) - \gamma \cdot \sigma_{11max} = U_0 - U_0 + \gamma \cdot \sigma_{11max}^0 - \gamma \cdot \sigma_{11max} = \gamma \cdot (\sigma_{11max}^0 - \sigma_{11max}). \quad (14)$$

Тогда время до зарождения трещины можно представить в виде (15):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{\gamma \cdot (\sigma_{11max}^0 - \sigma_{11max})}{KT}. \quad (15)$$

прочности (K, T, τ_0, γ) и силовыми параметрами микромеханики разрушения (σ_F, σ_{11max}):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{\gamma \cdot \sigma_F - \gamma(\sigma_{11max} + \sigma_{вн})}{KT} \quad (8)$$

или

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{\gamma \cdot (\sigma_F - \sigma_{11max} - \sigma_{вн})}{KT}. \quad (9)$$

Заметим, что при $\tau = \tau_0$, числитель равен нулю, а $\gamma \neq 0$, тогда $\sigma_F = \sigma_{11max} + \sigma_{вн}$, что можно рассматривать как нетермоактивируемое зарождение трещины – силовой подход.

Был рассмотрен и другой (энергетический) подход к описанию кинетики замедленного разрушения закаленной стали. Полагали, что остаточные внутренние микронапряжения в вершинах кристаллов мартенсита участвуют в процессе локального разрушения не аддитивно по отношению к локальным растягивающим напряжениям, вызванным внешними нагрузками и концентрацией напряжений. То есть, они участвуют в разных микромеханизмах и на разных этапах зарождения трещины. Энергия активации Q в формуле (1) может быть представлена как разность энергии барьера U_0 и потенциальной энергии от напряжений (10), (11), вызванных внешней нагрузкой $U(\sigma_{11max})$ и остаточными внутренними микронапряжениями $U(\sigma_{вн})$:

$$Q = U_0 - U(\sigma_{вн}) - U(\sigma_{11max}) \quad (10)$$

или

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - U(\sigma_{вн}) - U(\sigma_{11max})}{KT}. \quad (11)$$

Рассмотрим гипотетический случай силового разрушения при действии напряжения от внешней нагрузки в течение времени $\tau = \tau_0$, тогда энергия активации Q равна нулю:

$$U_0 - U(\sigma_{вн}) - U(\sigma_{11max}) = 0. \quad (12)$$

Тогда, с учетом предположения, что $U(\sigma_{11max}) = \gamma \cdot \sigma_{11max}^0$ получим (13):

$$U(\sigma_{вн}) = U_0 - \gamma \cdot \sigma_{11max}^0, \quad (13)$$

где σ_{11max}^0 соответствует величине σ_{11max} , при которой действует только силовой механизм разрушения ($\tau = \tau_0$).

Подставив в (10) выражение (13), определили энергию активации в виде (14):

Полагали, что значение σ_{11max}^0 по физическому смыслу и по величине соответствует характеристике сопротивления материала локальному разрушению σ_F – критическо-

му локальному напряжению (напряжению скола) (16):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{\gamma(\sigma_{\text{вн}}) \cdot (\sigma_F - \sigma_{11\text{max}})}{KT}. \quad (16)$$

Таким образом, с точки зрения кинетической теории прочности в зависимости от исходных предпосылок были получены две гипотезы: одна (силовая) – формула (9) – рассматривает роль остаточных микронапряжений и локальных напряжений от внешней нагрузки в механизме локального разрушения как аддитивную, другая (энергетическая) – формула (16) – как не аддитивную.

Материалы и методы эксперимента

Для проверки первой и второй гипотез были проведены экспериментальные исследования. Исследовали сталь 18X2H4BA (0,19 C; 1,5 Cr; 4,1 Ni; 0,20 Si; 0,37 Mn; 0,82 W; 0,003 S; 0,003 P вес. %), выплавленную в открытой индукционной печи на основе карбонильного железа. Использовали образцы $10 \times 10 \times 55$ мм с острым надрезом Шарпи. С целью получения состояний, различающихся уровнем остаточных внутренних микронапряжений, использовали термообработку: закалка 950°C , вода, отдых 15; 2700; 4600; 8700 мин и низкотемпературный отпуск 100°C , 2 ч. Образцы перед термообработкой вакуумировали в кварцевых колбах с целью избежать обезуглероживания поверхностных слоев при закалке.

Изучение влияния температуры испытаний и скорости нагружения на склонность к замедленному разрушению закаленной стали проводили сосредоточенным изгибом при различных скоростях движения траверсы испытательной машины от 0,01 до 10 см/мин при различных температурах испытания от 77 до 293 К. С помощью метода конечных элементов [2] приложенную нагрузку пересчитывали в максимальные локальные растягивающие напряжения $\sigma_{11\text{max}}$ в зоне локального разрушения перед концентратором напряжений вблизи границы упругой и пластической зон. Предел текучести, показатель и коэффициент упрочнения, необходимые для расчета локальных напряжений $\sigma_{11\text{max}}$ методом конечных элементов, определяли по результатам испытаний на растяжение гладких образцов МРГ-3 диаметром 4,3 мм [2]. Строили кривые замедленного хрупкого разрушения в координатах: логарифм времени до зарождения трещины – максимальное локальное растягивающее напряжение $\sigma_{11\text{max}}$ (рис. 1).

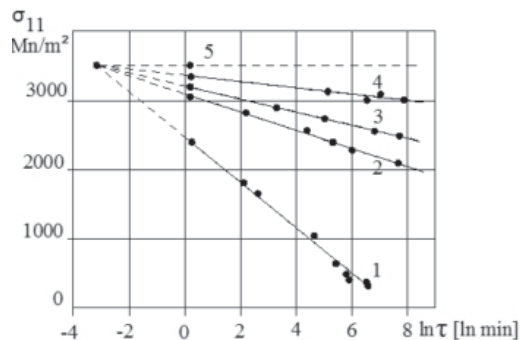


Рис. 1. Кривые замедленного хрупкого разрушения стали 18X2H4BA в закаленном состоянии после различного времени отжига: 1 – 15; 2 – 2700; 3 – 4600; 4 – 8700 мин; 5 – отпуск 100°C , 2 ч

Зависимости разрушающих максимальных локальных растягивающих напряжений $\sigma_{11\text{max}}$ от скорости нагружения и температуры испытаний ($77\text{--}293$ К) стали с различными уровнями остаточных внутренних микронапряжений представлены на рис. 2 и 3.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Влияние температуры испытаний и скорости нагружения на склонность к замедленному разрушению стали

В том случае, если справедлива первая гипотеза модели замедленного разрушения (9), то при $\tau = \tau_0$, т.е. при силовом механизме локального разрушения, должно выполняться условие (17), (18):

$$\sigma_F - \sigma_{11\text{max}} - \sigma_{\text{вн}} \quad (17)$$

или

$$\sigma_F = \sigma_{11\text{max}} + \sigma_{\text{вн}}. \quad (18)$$

Это означает, что при $\tau = \tau_0$ для разных кривых замедленного разрушения $\tau = f(\sigma_{11\text{max}}, \sigma_{\text{вн}})$, соответствующих различным уровням остаточных микронапряжений $\sigma_{\text{вн}}$, пересечения кривых в одной точке, т.е. точки «полюса», быть не может. Поэтому следует заключение, что первая гипотеза (9) не подходит для кинетической теории замедленного разрушения стали.

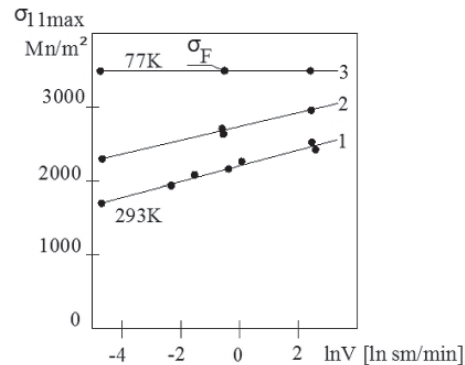


Рис. 2. Влияние скорости нагружения на локальное напряжение в месте зарождения трещины в свежезакаленной стали 18X2H4BA: 1 – 283 К; 2 – 170 К; 3 – 77 К;

○ – отдых 30 мин; ■ – отпуск 100°C , 2 ч

Вторая гипотеза (16), напротив, хорошо подтверждается экспериментом. Полученные экспериментальные зависимости $\ln \tau = (\sigma_{11\text{max}})$ для замедленного разрушения стали с различными уровнями остаточных внутренних микронапряжений хорошо описываются выражением (16).

Таким образом, эксперименты подтвердили, что для описания кинетики замедленного разрушения справедлива вторая гипотеза.

Было установлено (рис. 3), что ниже 77 К разрушающее $\sigma_{11\text{max}}$ стали с высоким уровнем остаточных внутренних микронапряжений не зависит от скорости нагружения для разных уровней остаточных внутренних ми-

кронапряжений, т.е. остаточные внутренние микронапряжения не дают вклада в напряжение зарождения трещины. В предельном случае, при достаточно низкой температуре образование зародышевой трещины происходит по достижении локальным напряжением σ_{11max} критического значения σ_F по силовому безактивационному механизму.

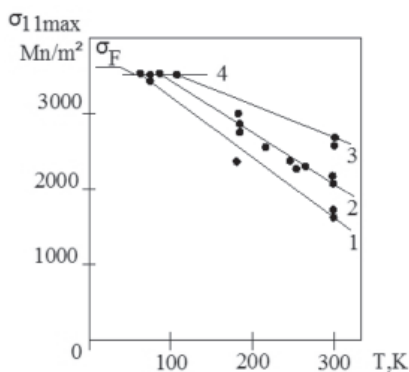


Рис. 3. Влияние температуры на напряжение зарождения трещины в свежезакаленной (отдых 30 мин) 1–3 и низкоотпущенной (■ – отпуск 100°C, 2 ч) – 4 стали 18X2H4BA при различных скоростях нагружения: 1 – 0,01; 2 – 0,5; 3 – 10 см/мин

Переход от термофлуктуационного замедленного разрушения к хрупкому разрушению сколом

Преобразуем уравнение (16), выразив напряжение сопротивления сколу σ_F в явном виде (19)–(21):

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \exp \frac{\gamma(\sigma_F - \sigma_{11max})}{KT}; \quad (19)$$

$$KT \ln \frac{\tau}{\tau_0} = \gamma(\sigma_F - \sigma_{11max}); \quad (20)$$

$$\frac{KT}{\gamma} \ln \frac{\tau}{\tau_0} + \sigma_{11max} = \sigma_F. \quad (21)$$

Полученное выражение (21) представляет критериальное условие зарождения трещины. Это уравнение показывает, что для достижения критериального значения прочности материала σ_F необходимо сочетание термоактивационной компоненты $\frac{KT}{\gamma} \ln \frac{\tau}{\tau_0}$ и локального напряжения σ_{11max} .

При замедленном термоактивированном разрушении преобладает термоактивационная компонента, а силовая компонента σ_{11max} не достаточна для разрушения сколом $\sigma_{11max} < \sigma_F$. В результате, реализуется механизм замедленного разрушения, зависящий от температуры и реализуемый за время τ .

В том случае, когда локальное напряжение σ_{11max} приближается к значению σ_F , роль термоактивационной компоненты в за-

рождении трещины уменьшается и происходит переход к силовому механизму хрупкого разрушения – сколу. При значительных скоростях нагружения (при малых τ) σ_{11max} достигает σ_F , тогда происходит разрушение сколом.

Выводы

1. Предлагается кинетическая модель замедленного разрушения закаленной стали, описывающая зависимость времени до зарождения трещины от остаточных внутренних микронапряжений, сопротивления сколу, уровня приложенного локального напряжения и температуры испытаний (16).

2. Условия перехода от термически активированного механизма при замедленном разрушении к силовому для локального разрушения закаленной стали могут быть описаны критериальным выражением (21), состоящим из суммы активационной и силовой компонент равных характеристике сопротивления стали локальному разрушению (сколу). Условия этого перехода зависят от уровня остаточных микронапряжений, времени (скорости) нагружения и температуры испытаний.

Список литературы

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
2. Мишин В.М. Структурно-механические основы локального разрушения конструкционных сталей: монография. – Пятигорск: Спецпечать, 2006. – 226 с.
3. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Критерий и физико-механическая характеристика сопротивления стали замедленному разрушению // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 3. – С. 37–42.
4. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Кинетическая модель замедленного разрушения закаленной стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – № 3. – С. 28–33.
5. Шиховцов А.А., Мишин В.М. Разделение силовой и термоактивационной компонент разрушения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 11. – С. 104–105.
6. Mishin V.M., Filippov G.A. Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya. – 2008. – № 3. – P. 28–33.
7. Shikhovtsov A.A., Mishin V.M. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2011. № 11. P. 104–105.

References

1. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij Je.E. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel. [The kinetic nature of strength of solids] Nauka, 1974, 560 p.
2. Mishin V.M. Strukturno-mehaniicheskie osnovy lokal'nogo razrusheniya konstrukcionnyh stalej. [Structural and mechanical basis of structural steels local failure]. Monograph. Pjatigorsk: Specpechat', 2006, 226 p.
3. Mishin V.M., Filippov G.A. Deformacija i razrushenie materialov. 2007, no 3. p. 37–39.
4. Mishin V.M., Filippov G.A. Deformacija i razrushenie materialov. 2007. no 3. p. 39–42.
5. Mishin V.M., Filippov G.A. Deformacija i razrushenie materialov. 2007. no 6. p. 21–26.
6. Mishin V.M., Filippov G.A. Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya. 2008. no3. p. 28–33.
7. Shikhovtsov A.A., Mishin V.M. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij 2011 no 11. p. 104–105.

Рецензенты:

Януян Э.Г., д.ф.-м.н., декан инженерного факультета, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Пятигорск;
Казуб В.Т., д.т.н., профессор, зав. кафедрой физики и математики Пятигорской государственной фармацевтической академии, г. Пятигорск.

Работа поступила в редакцию 07.03.2013.