

## ВЛИЯНИЕ ОХРУПЧИВАЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЛОКАЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ГРАНИЦ ЗЕРЕН МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

<sup>1</sup>Волоконский М.В., <sup>2</sup>Филиппов Г.А., <sup>1</sup>Мишин В.М.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Северо – Кавказский федеральный университет», Пятигорск, Россия (357500, Пятигорск, ул. 40 лет Октября 56), e-mail: [misha\\_volokonski@mail.ru](mailto:misha_volokonski@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт качественных сталей ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, Москва, Россия (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 9/23), e-mail: [igs12@yandex.ru](mailto:igs12@yandex.ru)

Целью работы является количественная оценка локальной прочности границ зерен закаленной мартенситной стали в зависимости от содержания примеси фосфора, сурьмы и олова в теле и на границах зерен при замедленном разрушении. Предложена методика количественного определения локальной прочности границ зерен закаленной стали, основанная на применении метода конечных элементов для определения истинных значений пороговых максимальных растягивающих напряжений в локальной области перед надрезом образца Шарпи при испытаниях на замедленное разрушение. В этом случае, уровень порогового максимального растягивающего напряжения соответствует локальной прочности границы зерна при реализации механизма замедленного разрушения. Установлены значения локальной прочности границы зерен закаленной стали при различных концентрациях примеси фосфора, а также при изотермической выдержке. Показано, что снижение локальной прочности границ зерен при более низкой температуре в аустенитной области, проявляется в увеличении склонности стали к замедленному разрушению в закаленном состоянии. Это объясняется адсорбционным обогащением фосфором границ зерен в аустените, приводящего к ослаблению межзёрненного сцепления по границам исходных аустенитных зёрен. Показано количественно, что снижение локальной прочности границ зерен закаленной стали примесями фосфора, сурьмы и олова связано с образованием сегрегаций на границах зёрен в виде  $\gamma$ -фазы. В наибольшей степени локальную прочность границ зерен снижает фосфор благодаря образованию сегрегаций на границах исходных аустенитных зёрен. Сурьма и олово в меньшей степени снижают прочность границ зерен за счет образования сегрегации на границах.

Ключевые слова: закаленная сталь, граница зерна, охрупчивающие примеси, фосфор, сурьма, олово, локальная прочность, локальное напряжение, замедленное разрушение.

## INFLUENCE EMBRITTLING IMPURITIES ON THE LOCAL STRENGTH OF GRAIN BOUNDARIES OF MARTENSITIC STEELS

<sup>1</sup>Volokonsky M.V., <sup>2</sup>Filippov G.A., <sup>1</sup>Mishin V.M.

<sup>1</sup>North - Caucasian Federal University, Pyatigorsk, Russia (357500, Pyatigorsk, str. 40 October 56), e-mail: [misha\\_volokonski@mail.ru](mailto:misha_volokonski@mail.ru)

<sup>2</sup>State Scientific Center of the Russian Federation "TsNIIchermet them. I.P.Bardina" Institute of High Quality Steel, Moscow, Russia (105005, Moscow, 2nd Bauman Str., 9/23), e-mail: [igs12@yandex.ru](mailto:igs12@yandex.ru)

The aim of the work is to measure the strength of the local grain boundaries tempered martensitic steel, depending on the impurity content of phosphorus, antimony and tin in the body and at the grain boundaries during delayed fracture. The method of quantifying the local strength of the grain boundaries of hardened steel, based on the application of finite element method to determine the true values of the threshold maximum tensile stresses in the local area before the notched Charpy specimens when tested on delayed fracture. In this case, the level of the threshold voltage corresponds to the maximum tensile strength of the local grain boundary in the implementation of the mechanism of delayed fracture. Set value of the local strength of the grain boundaries of hardened steel with different impurity concentrations of phosphorus and at isothermally. It is shown that reduction of local strength of the grain boundaries at a lower temperature in the austenite region results in increased tendency to become delayed fracture in the quenched condition. This is due to the adsorption of phosphorus enrichment in the austenite grain boundaries, leading to a weakening of intergrain coupling on the boundaries of prior austenite grains. Shown quantitatively that reduction of local strength of the grain boundaries of hardened steel impurities of phosphorus, antimony and tin is associated with the formation of segregates at grain boundaries in the form of  $\gamma$ -phase. The greatest strength of the local grain boundaries decreases due to formation of phosphorus segregation at prior austenite grain boundaries. Of antimony and tin to a lesser extent reduce the strength of the grain boundaries due to the formation boundary segregation.

Keywords: hardened steel, grain boundary, embrittle impurities, phosphorus, antimony, tin, local strength, local strength, delayed fracture.

Понимание роли элементов структуры в процессе хрупкого разрушения сталей является важнейшим вопросом для физики прочности. Повышенное содержание в стали охрупчивающих примесей (например, фосфора, сурьмы, олова и других) может оказывать существенное влияние на прочность границ зерен. [5,6,8,10]. Поэтому, актуальным является количественная оценка прочности границ зерен в зависимости от их структурного состояния, в том числе от влияния охрупчивающих примесей.

Ранее для оценки влияния примесей использовались параметры разрушения, усредненные по объёму образцов – например номинальные (средние) напряжения разрушения [5]. В то же время, ключевой стадией процесса хрупкого разрушения является стадия зарождения микротрещины и процесс ее развития до длины порядка размера зерна, называемый процессом локального разрушения [9]. Авторами был разработан подход к оценке условий локального разрушения с помощью применения образцов с концентраторами напряжений и расчета максимальных локальных растягивающих напряжений в зоне локального разрушения перед надрезом [1,3,5]. Такой подход позволяет установить истинные значения локальных напряжений, инициирующих процесс локального разрушения. Если зарождение микротрещины и дальнейшее её подрастание происходит по границе одного зерна (зона локального разрушения), то эти локальные напряжения характеризуют прочность границ зерен [2]. Используя испытания на замедленное разрушения для вскрытия границ зёрен и, применяя различные виды термообработки стали, управляли изменением прочности границ зерен.

Целью работы является установление влияния охрупчивающих примесей фосфора, сурьмы и олова на локальную прочность границ исходных аустенитных зерен мартенситных сталей после закалки.

### **Методика эксперимента**

Исследовали сталь 18Х2Н4ВА: 1) с различными добавками фосфора от 0,003 до 0,040 %; 2) с содержанием 0,0005 и 0,007 % сурьмы; 3) с добавкой 0,012 % Sn. Применяли различные режимы закалки после нагрева и изотермической выдержки [6,8,9].

Испытания на замедленное хрупкое разрушение проводили на испытательной машине «Instron» нагружением сосредоточенным изгибом образцов до различных уровней нагрузки и выдержкой до разрушения [5]. Момент зарождения трещины определяли по сигналу акустической эмиссии [5]. Строили кривые замедленного разрушения в координатах: номинальное напряжение – время до зарождения трещины (рис. 1а, 2а, 3а). Номинальное напряжение ( $\sigma$ ) при сосредоточенном изгибе стандартного образца Шарпи определяли по формуле (1).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка;  $L$  – расстояние между опорами;  $b$  – толщины образца (10 мм);  $h$  – высота образца с учетом надреза (8 мм).

Снижение приложенного напряжения приводило к увеличению времени до зарождения трещины. С помощью метода конечных элементов номинальные напряжения ( $\sigma$ ) пересчитывали в максимальные локальные растягивающие напряжения ( $\sigma_{11\max}$ ) перед концентратором напряжений в зоне локального разрушения [1,4,5]. Причём координата местоположения  $\sigma_{11\max}$  смещается вместе с границей пластической зоны вглубь образца [10]. Предел текучести, показатель и коэффициент упрочнения, необходимые для расчета максимальных локальных растягивающих напряжений ( $\sigma_{11\max}$ ) методом конечных элементов, определяли по результатам испытаний на растяжение гладких образцов МРГ-3 диаметром 4,3 мм, прошедших аналогичную термообработку.

#### **Экспериментальные результаты и их обсуждение**

Склонность стали к замедленному хрупкому разрушению (ЗХР) после закалки связана с особенностями неравновесной структуры закаленного мартенсита [5,6,8,10]. При ЗХР происходит интеркристаллитное зарождение и медленное распространение трещины по границам исходных аустенитных зёрен. С этой точки зрения замедленное разрушение можно рассматривать как метод испытаний, позволяющий вскрывать границы исходных аустенитных зёрен в неотпущенном мартенсите и исследовать влияние примесей на прочность границ зерен. Для изменения прочности границ зерен, помимо введения охрупчивающих примесей использовали термообработки, приводящие к концентрации примесей на границах зерен. При этом в сталях происходит образование сегрегаций (тонких мономолекулярных слоев) примесей на границах зёрен, приводящих к интеркристаллитному распространению трещины, что подтверждается исследованиями зернограницных изломов с помощью Оже-спектроскопии [5,6,8,10].

#### **Влияние сегрегации примеси фосфора на локальную прочность границ исходных аустенитных зерен**

Исследовали сталь 18X2H4BA (0,003 S; 0,0005 Sb; 0,0005 Sn; 0,003 As, масс. %) с добавками фосфора. Фрактографический анализ изломов разрушенных образцов показал, что развитие трещины при замедленном разрушении данных сталей происходит практически полностью по границам исходных аустенитных зёрен. Быстрое распространение трещины на завершающей стадии замедленного разрушения происходит через зерно в сталях с 0,003 и 0,016 % P. В стали с 0,026 % фосфора "долгом" происходит частично по границам исходных аустенитных зёрен.

На рис. 1,а приведена зависимость времени до зарождения трещины от номинального напряжения для стали с содержанием фосфора 0,003; 0,016 и 0,026 % после закалки от 1000 °С и закалки

с изотермической выдержкой при 860 °С. Видно, что чем ниже уровень номинального напряжения, тем больше время до зарождения трещины. Повышение содержания фосфора в стали понижает пороговое номинальное напряжение, нагружение ниже которого не вызывает замедленного разрушения, и время до разрушения при постоянном напряжении.

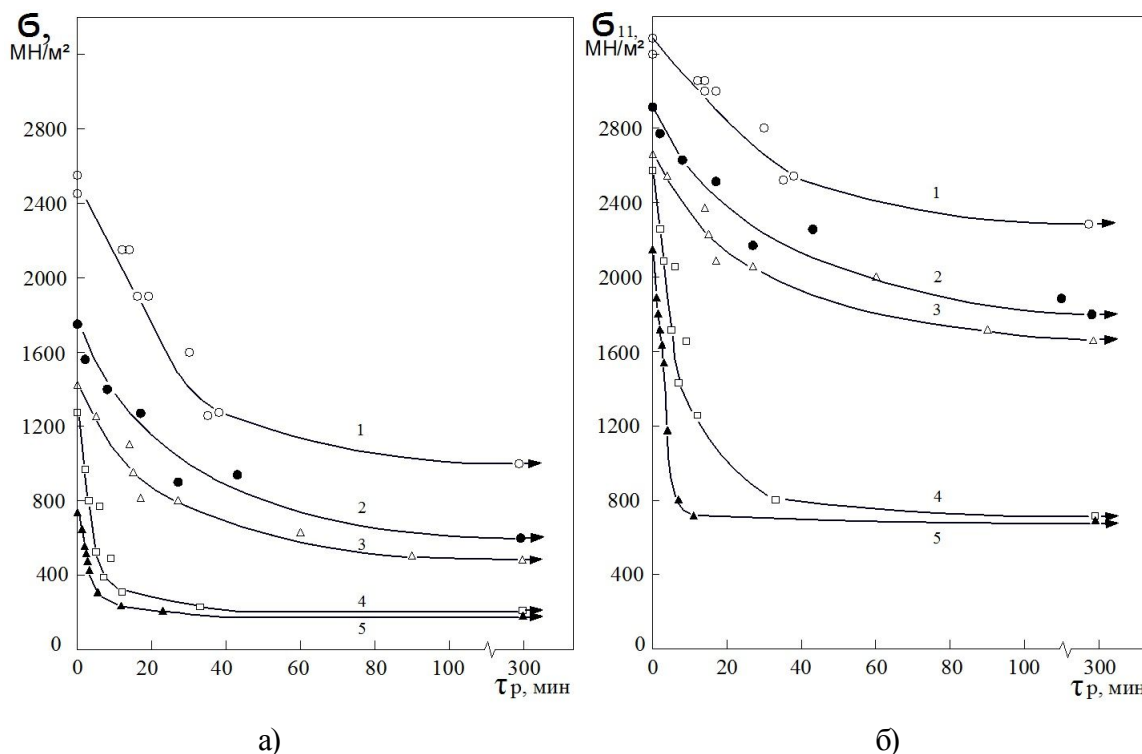


Рис. 1. Влияние а) номинального (среднего)  $\sigma$  и б) локального растягивающего напряжения  $\sigma_{11}$  на время до разрушения закаленной стали 18X2H4BA с различным содержанием фосфора: 1 - 0,003 %; 2, 4 - 0,016 %; 3, 5 - 0,026 %; 1, 2, 3 - закалка от 1000 °С; 4, 5 - закалка после нагрева до 1000 °С и изотермической выдержки при 860 °С.

Кривые замедленного разрушения на рис. 1,а были пересчитаны с помощью метода конечных элементов в координаты: время до зарождения трещины – максимальное локальное растягивающее напряжение ( $\sigma_{11max}$ ), представленные на рис.1,б. Значения пороговых максимальных локальных растягивающих напряжений соответствуют локальной прочности границы зерна при реализации замедленного разрушения. Таким образом, установлено количественное влияние охрупчивающих примесей на локальную прочность границ зёрен. Так, повышение содержания фосфора в стали от 0,003 до 0,026 % снижает прочность границы зерна после закалки от 1000 °С с 2400 до 1700  $\text{MN/m}^2$  (рис. 1,б, кривые 1-3).

Интеркристаллитный характер разрушения при замедленном разрушении закаленной стали является следствием повышенной упругой энергии границ исходных аустенитных зёрен, возникающей в результате особенностей мартенситного превращения [6,8,10]. Повышение содержания в стали фосфора понижает локальную прочность границ зёрен [6]. Более низкая локальная прочность границ зёрен, связана с большей концентрацией фосфора на границах аустенитных зёрен. Резкая закалка от

высоких температур, фиксирует состояние границ зёрен аустенита с повышенной концентрацией фосфора. При этом фосфор уменьшает поверхностную энергию железа. Поэтому сегрегация фосфора на границах исходных аустенитных зёрен в закаленной стали снижает величину эффективной поверхностной энергии разрушения при распространении трещины по границам зёрен и, соответственно, их локальную прочность.

В результате закалки с изотермической выдержкой при 860 °С локальная прочность границ при кратковременном испытании снижается по сравнению с закалкой от 1000 °С с 2650 до 2180 МН/м<sup>2</sup> и уровень порогового локального напряжения, характеризующего локальную прочность границ зерен при замедленном разрушении, снижается от 1700 до 700 МН/м<sup>2</sup>. Аналогичные результаты получены для стали с содержанием фосфора 0,016 % (рис.1,б). Поскольку склонность к замедленному разрушению чистой стали (0,003 % Р) после закалки в результате изотермической выдержки при 860 °С практически не изменилась по сравнению с закалкой от 1000 °С, поэтому можно полагать, что и прочность границ зерен также не изменилась. Закалка с изотермической выдержкой при более низкой температуре в аустенитной области уменьшает локальную прочность границ зерен стали, содержащей фосфор, вследствие чего понижается сопротивление зарождению и развитию трещины по границам исходных аустенитных зёрен. Повышение температуры аустенизации, напротив, приводит к повышению локальной прочности границ зерен, что приводит к повышению сопротивления разрушению вдоль границ исходных аустенитных зёрен.

Можно полагать, что понижение локальной прочности границ зерен обусловлено повышением концентрации фосфора на границах зёрен аустенита. Образование сегрегации фосфора на границах аустенитных зёрен в ходе выдержки при более низкой температуре в аустените, по-видимому, снижает величину эффективной поверхностной энергии разрушения при распространении трещины по границам зёрен. Повышение температуры аустенизации, вероятно, приводит к уменьшению концентрации фосфора на границах зёрен аустенита и повышению локальной прочности границ зерен стали после закалки.

Увеличение содержания фосфора, а также изотермическая выдержка при более низкой температуре в аустенитной области снижают локальную прочность зерен стали, что проявляется в увеличении склонности стали к замедленному разрушению в закаленном состоянии, что объясняется адсорбционным обогащением фосфором границ зёрен в аустените, приводящего к ослаблению межзёрненного сцепления по границам исходных аустенитных зёрен.

Изучение изломов образцов после замедленного разрушения с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии качественно подтверждает результаты проведенного анализа. Так, после закалки от 1000 °С в изломе стали с 0,016 % Р сегрегация фосфора не обнаружена, что может быть следствием малой доли интеркристаллитной составляющей в изломе. Однако, после закалки с

изотермической выдержкой при 860 °С концентрация фосфора в изломе этой стали почти в 70 раз, а для стали с 0,026 % Р в 100 раз больше, чем в объеме [6,9].

Таким образом, повышенная концентрация фосфора на границах зёрен закаленной стали снижает локальную прочность границ, измеряемую уровнем пороговых максимальных локальных растягивающих напряжений.

### **Влияние сурьмы на локальную прочность границ зерен стали**

На поверхности изломов сталей, разрушенных в состоянии отпускной хрупкости, обнаруживаются повышенные концентрации атомов сурьмы. Излом сталей в таком состоянии имеет интеркристаллитный характер, преимущественно вдоль границ исходных аустенитных зёрен [8]. Полагали, что снижение прочности границ исходных аустенитных зёрен в результате обогащения сурьмой границ может происходить как в ходе отпуска закаленного мартенсита, так и в аустенитной фазе перед закалкой.

Исследовали сталь 18Х2Н4ВА, выплавленную из чистых шихтовых материалов и содержащую 0,0005 и 0,007 % сурьмы [8]. По результатам испытаний на замедленное разрушение были построены кривые замедленного разрушения в координатах: время до зарождения трещины – номинальное напряжение (рис. 2,а). Эти кривые с помощью метода конечных элементов [1,9] были пересчитаны в координаты: время до зарождения трещины – максимальное локальное растягивающее напряжение ( $\sigma_{11\max}$ ) (рис. 2,б). В этом случае, величина порогового максимального локального растягивающего напряжения численно характеризует локальную прочность границы зерна при реализации механизма замедленного разрушения.

Сопротивление сколу стали, закаленной от 1000 °С, в результате увеличения содержания сурьмы от 0,0005 до 0,007 % снижается от 3200 до 3050 МН/м<sup>2</sup>, а величина порогового напряжения, характеризующего локальную прочность границы зерна - от 2380 до 1500 МН/м<sup>2</sup> (рис. 2,б). Изотермическая выдержка при 860 °С увеличивает склонность к замедленному разрушению стали, содержащей 0,007 % сурьмы, и практически не влияет на неё в случае более чистой стали. Сопротивление сколу в результате изотермической выдержки стали, содержащей 0,007 % сурьмы, уменьшается от 3050 до 2500 МН/м<sup>2</sup>, а пороговое напряжение, соответствующее локальной прочности границы зерна - от 1500 до 800 МН/м<sup>2</sup> (рис. 2,б).

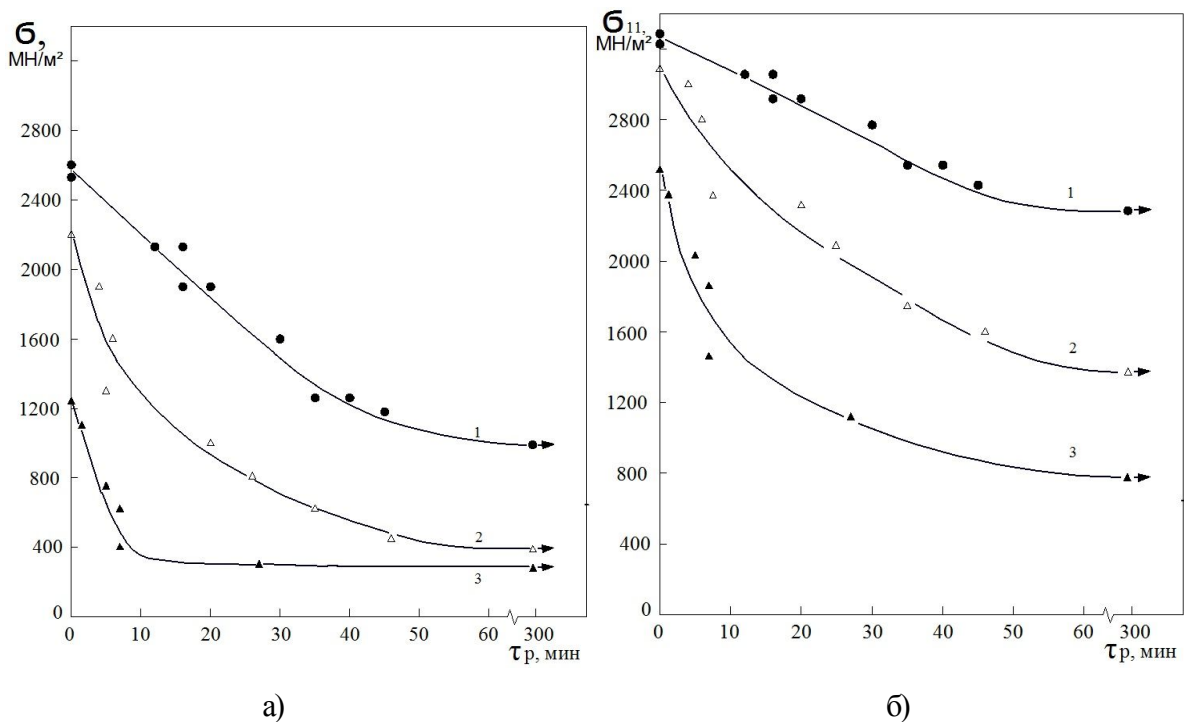


Рис. 2. Зависимость времени до разрушения  $\tau_p$  от а) номинального (среднего) напряжения, б) локального растягивающего напряжения  $\sigma_{11}$  для закаленной стали 18X2H4BA с 0,0005 % Sb (1) и 0,007 % Sb (2, 3); 1, 2 – зак. 1000 °С; 3 – зак. после нагрева до 1000 °С и изотермической выдержки при 860 °С.

Можно полагать, что понижение локальной прочности границ зерен в результате увеличения содержания сурьмы или изотермической выдержки при более низкой температуре в аустените является следствием адсорбционного обогащения границ зёрен аустенита атомами сурьмы, приводящего к понижению сопротивления зарождению и распространению интеркристаллитной трещины. На основании результатов испытаний на замедленное разрушение установлено, что понижение температуры изотермической выдержки с 1000 до 860 °С повышает концентрацию атомов сурьмы на границах зёрен аустенита от 0,1 до 0,5 ат. %. Этот факт можно объяснить с помощью известных представлений об образовании равновесной сегрегации примесей на границах зёрен [8].

Обогащение границ зёрен аустенита атомами сурьмы, фиксируемое резкой закалкой, сохраняется при последующем отпуске стали. Концентрация атомов сурьмы на границах зёрен аустенита после закалки с 860 °С в 160 раз больше объёмной концентрации, а после закалки с 1000 °С – в 40 раз [8,10]. Анализ, проведенный с помощью Оже-спектроскопии поверхности интеркристаллитных изломов хромоникелевой стали, закаленной с 870 °С и отпущенной при 480 °С в течение 24 ч, доказал, что концентрация сурьмы на границах зёрен в 300 раз больше, чем в объеме. Концентрация сурьмы на границах исходных аустенитных зёрен в стали близкого состава закаленной с 1075 °С и отпущенной при 480 °С в 110 раз больше, чем в объеме [10].

Таким образом, снижение локальной прочности границ зерен хромоникелевой стали связано со склонностью примеси сурьмы к образованию сегрегации на границах исходных аустенитных зёрен в  $\gamma$  - фазе. Повышение концентрации атомов сурьмы на границах происходит при понижении

температуры нагрева аустенита. Следовательно, сегрегация атомов сурьмы на границах исходных аустенитных зёрен, снижает сопротивление интеркристаллитному распространению трещины при замедленном разрушении после закалки и, вследствие этого, снижается локальная прочность границ зерен.

### Влияние олова на локальную прочность границ зерен стали

Исследовали сталь 18X2H4BA, выплавленную на чистых шихтовых материалах с добавкой 0,012 % Sn. Использовали термообработку: закалкой от 1000 °С и закалка с изотермической выдержкой при 860 °С. По результатам испытаний на замедленное разрушение были построены кривые замедленного разрушения в координатах: время до зарождения трещины – номинальное напряжение (рис. 3,а). Эти кривые с помощью методом конечных элементов были пересчитаны в координатах: время до зарождения трещины – максимальное локальное растягивающее напряжение ( $\sigma_{11 \max}$ ) (рис. 3б).

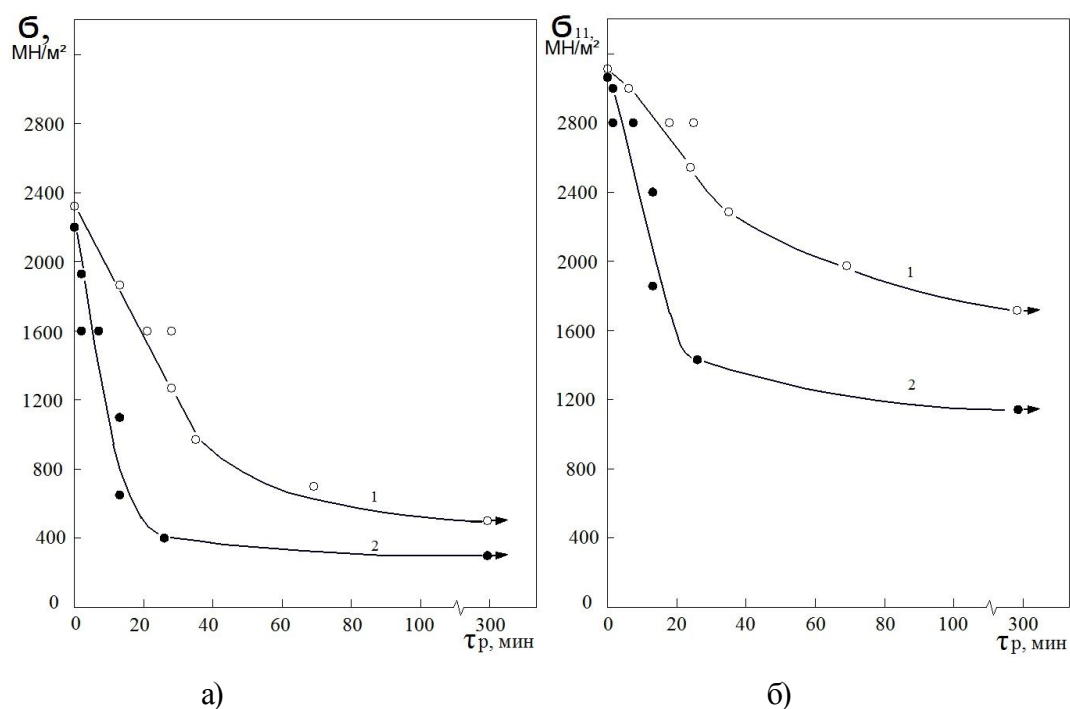


Рис. 3. Зависимость времени до разрушения  $\tau_p$  от а) номинального (среднего) напряжения, б) локального растягивающего напряжения  $\sigma_{11}$  для закаленной стали 18X2H4BA с 0,012 % Sn после закалки от 1000 °С (1) и от 1000 °С с изотермической выдержкой при 860 °С (2).

Закалка с изотермической выдержкой при 860 °С повышает склонность стали к замедленному разрушению в свежезакаленном состоянии по сравнению с закалкой от 1000 °С (рис. 3,а) [10]. Изотермическая выдержка при 860 °С стали с добавкой олова уменьшает длительность инкубационного периода зарождения трещины при замедленном разрушении и снижает пороговое напряжение (рис. 3,а).

Полагали, что изотермическая выдержка при более низкой температуре в аустенитной области повышает концентрацию олова на границах исходных аустенитных зёрен в результате образования



равновесных сегрегаций [10]. Было количественно установлено, что локальная прочность границ зёрен, оцениваемая уровнем порогового максимального локального растягивающего напряжения, при замедленном разрушении, снижается с 1700 до 1150 МН/м<sup>2</sup> за счёт их ослабления зернограницной сегрегацией примеси олова.

Таким образом, олово, также как фосфор и сурьма, склонны к обогащению границ зёрен аустенита, что снижает сопротивление зарождению и распространению трещины при замедленном разрушении закаленной стали и, соответственно снижают локальную прочность исходных аустенитных зерен.

### **Заключение**

1. Предложена методика количественного определения локальной прочности границ зерен закаленной стали, основанная на применении метода конечных элементов для определения истинных значений пороговых максимальных растягивающих напряжений в локальной области перед надрезом образца Шарпи при испытаниях на замедленное разрушение. В этом случае пороговое максимальное растягивающее напряжение соответствует локальной прочности границы зерна.
2. Установлены значения локальной прочности границы зерен закаленной стали при различных концентрациях примеси фосфора, а также при изотермической выдержке. Показано, что снижение локальной прочности границ зерен при более низкой температуре в аустенитной области, проявляется в увеличении склонности стали к замедленному разрушению в закаленном состоянии. Это объясняется адсорбционным обогащением фосфором границ зёрен в аустените, приводящего к ослаблению межзёренного сцепления по границам исходных аустенитных зёрен.
3. Показано, что снижение локальной прочности границ зерен закаленной стали примесями фосфора, сурьмы и олова связано с образованием сегрегаций на границах зёрен в виде  $\gamma$  – фазы. В наибольшей степени локальную прочность границ зерен снижает фосфор благодаря образованию сегрегаций на границах исходных аустенитных зёрен. Сурьма и олово в меньшей степени снижают прочность границ зерен за счет образования сегрегации на границах.

### **Список литературы**

1. Волоконский М.В., Мишин В.М. Оценка локальной прочности границы зерна мартенситной стали на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №8. – Ч.3. – С.170-171.
2. Волоконский М.В., Мишин В.М. Оценка прочности границ зерен стали, ослабленных фосфором и остаточными напряжениями. // Современные наукоемкие технологии. 2013. – №3. – С.104-105.

3. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Кинетическая модель замедленного разрушения закаленной стали. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – № 3. – С.28-33.
4. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Критерий и физико-механическая характеристика сопротивления стали замедленному разрушению. // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 3. – С. 37-42.
5. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Физика замедленного разрушения сталей. (Монография). – Минеральные Воды: Полиграфпром, 2013. – 455 с.
6. Саррак В. И., Филиппов Г.А., Чевская О.Н, Литвиненко Д.А. Адсорбция фосфора на границах зерен аустенита и склонность закаленной стали к задержанному разрушению // ФММ. – 1979. – №6. – С. 1262-1270.
7. Филиппов Г.А. О взаимодействии примесей с границами зерен в аустените // ФММ. – 1983. – Т.55. – в.3. – С. 528-532.
8. Филиппов Г.А., Чевская О.Н. Сегрегация атомов сурьмы на границах зерен в аустените и сопротивление интеркристаллитному хрупкому разрушению стали после закалки // Проблемы прочности. – 1982. – №11. – С. 94-98.
9. Шиховцов А.Н., Мишин В.М. Кинетика и микромеханика замедленного разрушения стали. // Фундаментальные исследования. – 2013. – №4. – С.858-861.
10. Sarrak V.I., Mishin V.M. Delayed failure of steels // Soviet Materials Science. 1992. V.28. № 5. p. 419-420.

**Рецензенты:**

Янукян Э.Г., д.ф.-м.н., декан инженерного факультета, Северо – Кавказский федеральный университет, филиал в г. Пятигорске, г.Пятигорск;  
Казуб В.Т., д.т.н., профессор, зав. кафедрой физики и математики, Пятигорская государственная фармацевтическая академия, г.Пятигорск.