

УДК 539.4

А.В. Лавров¹, В.С. Ерасов¹, Д.Н. Ландик¹**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ТРАКТОВКЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ Я.Б. ФРИДМАНА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94

Рассмотрена объединенная теория прочности Я.Б. Фридмана в части критериев прочности материала. Предложен новый подход к построению диаграммы механического состояния, актуализирующий критерии прочности с точки зрения механики разрушения. Для учета влияния вида напряженного состояния на механизм распространения дефектов предложено в диаграмме механического состояния заменить максимальные приведенные растягивающие напряжения на средние нормальные (гидростатические) напряжения.

Рассмотрены вопросы взаимосвязи пластичности и прочности двухфазных структур при различных коэффициентах жесткости напряженного состояния. Показано, что кривая зависимости прочности материала от параметра, характеризующего его пластичность, имеет универсальную форму независимо от коэффициента жесткости напряженного состояния.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: теория прочности, тензор, пластичность, гидростатическое давление, коэффициент интенсивности напряжений.

The united strength theory of Ya.B. Fridman in a part of strength criteria of a material is considered. The new approach to construction of the mechanical condition diagramme, actualizing the strength criteria with the point of view of the fracture mechanics is offered. It is offered to replace the maximum effective tension stress pressure with average normal (hydrostatic) stress in the diagramme of mechanical condition in order to account influence of stress pattern on the mechanism of defect growth.

Issues of interrelation of plasticity and strength of diphasic structures are considered at various coefficients of rigidity of stress condition. It is shown, that influential curve of material strength from the plasticity parameter, has the universal form irrespective of rigidity coefficient of stress condition.

This work is executed within the limits of realization of a complex scientific direction 2. «The fundamental-focused researches, qualification of the materials, nondestructive test» («Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: the strength theory, tensor, plasticity, hydrostatic pressure, stress intensity factor.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Обеспечение высоких значений характеристик прочности и надежности конструкционных материалов в изделиях авиационной техники является важнейшей задачей современного авиационного материаловедения [1–3]. При этом полнота реализации свойств материала в конструкции определяется не только исходным уровнем его механических характеристик [4–6], но и внешними факторами, такими как форма и размеры детали, характер действующих нагрузок [7], условия эксплуатации изделия [8] и др.

Одним из основных факторов, определяющих работоспособность материала в конструкции, является вид напряженного состояния [7], влияние которого на механические свойства оценива-

ется различными моделями – в том числе объединенной теорией прочности Я.Б. Фридмана [9], получившей экспериментальное подтверждение для многих конструкционных материалов [10, 11].

Материалы и методы

В развитие представлений Н.Н. Давиденкова о существовании двух видов прочности при разрыве, соответствующих либо кристаллическому, либо волокнистому типу излома [12], Я.Б. Фридман выдвинул ряд следующих положений [10, 11], которые легли в основу объединенной теории прочности.

1. Каждый материал в зависимости от вида напряженного состояния может находиться либо

в хрупком, либо в пластическом состоянии. В соответствии с этим, каждый материал подвергается двум основным типам разрушения – отрыву и срезу, и обладает двумя различными характеристиками разрушения: сопротивлением разрушению от нормальных напряжений (сопротивлением отрыву) $S_{отр}$ и сопротивлением разрушению от касательных напряжений (сопротивлением срезу) t_k . Для хрупких материалов $S_{отр} \ll t_k$, тогда как у пластичных материалов $S_{отр} \gg t_k$.

2. Прочность материала в хрупком состоянии оценивается с помощью критерия второй теории прочности (критерий максимальных удлинений), а в пластическом состоянии – третьей теории прочности (критерий максимальных касательных напряжений).

3. Напряженное состояние характеризуется коэффициентом жесткости $\alpha = t_{max} / S_{max}^n$, где t_{max} – максимальные касательные напряжения; S_{max}^n – максимальные «приведенные» растягивающие напряжения, определяемые по второй теории прочности через величину максимальной деформации удлинения при данной схеме нагружения. Так, для случая одноосного растяжения $\alpha = 0,5$ ($t_{max} = 0,5\sigma_1$, $S_{max}^n = \sigma_1$), для кручения $\alpha = 0,8$ ($t_{max} = \sigma_1$, $S_{max}^n = \sigma_1 + 0,25\sigma_1$ при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,25$), для одноосного сжатия $\alpha = 2$ ($t_{max} = 0,5\sigma_1$, $S_{max}^n = 0,25\sigma_1$ при $\mu = 0,25$) и т. д. Таким образом, в случае наиболее «жесткого» напряженного состояния – всестороннего растяжения – $\alpha = 0$, для наиболее «мягкого» напряженного состояния – всестороннего сжатия – $\alpha = \infty$.

4. Сопротивление материала пластической деформации описывается обобщенной кривой

течения, построенной в координатах «максимальное истинное касательное напряжение (t_{max}) – максимальный истинный сдвиг (g_{max})» (рис. 1, правая часть). Данная кривая не зависит или мало изменяется в зависимости от вида напряженного состояния – по крайней мере, на стадии равномерной деформации.

5. Для оценки свойств материала используется диаграмма механического состояния (рис. 1), в которой учтены обобщенная кривая течения, сопротивления отрыву и срезу, а также имеется возможность оценки влияния вида напряженного состояния на тип разрушения материала при воздействии однократных кратковременных статических нагрузок.

Поскольку данная теория описывает как хрупкое, так и пластическое состояние материалов с использованием различных критериев (вторая и третья теории прочности), она носит название объединенной теории прочности.

Отметим ряд замечаний по объединенной теории прочности. Так, авторы работы [9], указывая на приближенный характер критериев, лежащих в основе теории Я.Б. Фридмана, считают, что данная теория представляет скорее научный, чем технический интерес.

Я.Б. Фридман в работе [11] также отмечает приближенный характер диаграммы механического состояния и предложенных критериев оценки механических свойств материалов. Так, приближением является независимость сопротивлений срезу и отрыву от напряженного состояния, особенно для трехосных напряженных состояний. Кроме того, для многих пластичных материалов (некоторые алюминиевые, медные сплавы и т. п.) сопротивление отрыву, которое характеризуется

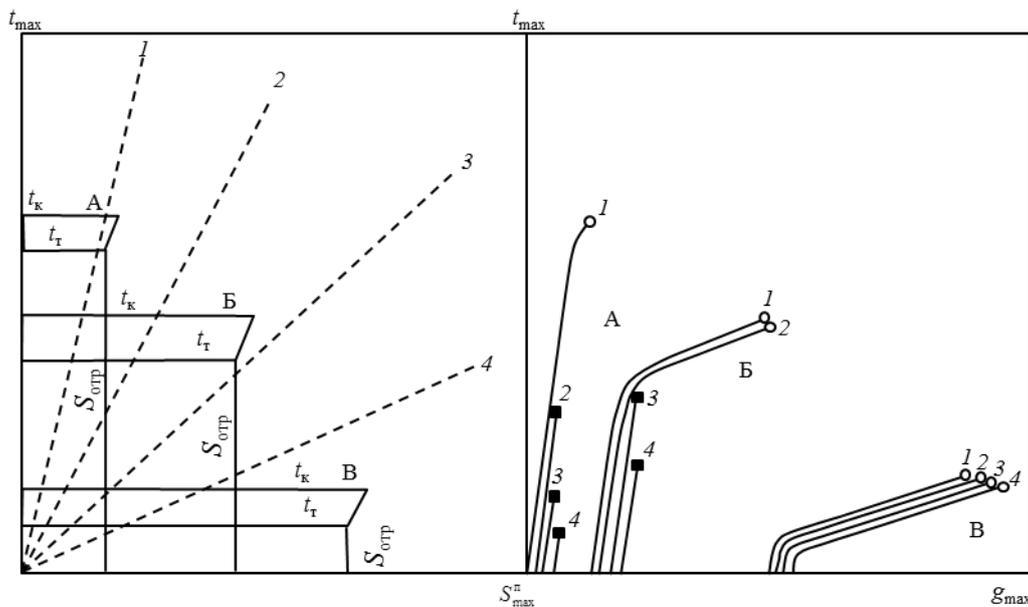


Рис. 1. Диаграмма механического состояния материалов при способах нагружения:

1 – вдавливанием; 2 – одноосным сжатием; 3 – кручением; 4 – одноосным растяжением; А – очень твердые материалы; Б – твердые материалы; В – мягкие материалы [11]

отсутствием пластических деформаций вплоть до момента разрушения, не достигается при самых «жестких» вариантах нагружения ($\alpha \rightarrow 0$) [11]. При этом сама классификация процессов разрушения на отрыв и срез, берущая начало в работах А.Ф. Иоффе и Н.Н. Давиденкова первой половины XX в. [10, 12], носит чисто феноменологический характер, что становится очевидным с учетом современных представлений о механизме кратковременного статического разрушения [13–16].

Согласно работам [13–15], процесс разрушения независимо от макроскопического характера излома предполагает наличие следующих основных стадий:

- образование микронесплошностей (микротрещин, пор);
- подрастание и объединение микронесплошностей;
- окончательный долом.

При изначальной дефектности материала первая стадия может отсутствовать.

Таким образом, как хрупкое, так и пластическое разрушения происходят по механизму образования и развития дефектов или подрастания дефектов, изначально присутствовавших в структуре [13–15], а характер разрушения (хрупкое или пластическое) можно описать параметром $s = dl/d\varepsilon$, где l – размер дефекта, мм; ε – деформация без учета дефекта (брутто-деформация). При этом хрупкое разрушение характеризуется быстрым развитием дефекта при увеличении деформации ($s \gg 0$), а пластическое разрушение – медленным ($s \ll 1$).

В данной статье рассмотрены некоторые положения объединенной теории прочности Я.Б. Фрийдмана с учетом современных научных подходов.

Обсуждение и результаты

Условие разрушения материала

Рассмотрим диаграмму механического состояния (рис. 1). Левая часть диаграммы представлена

в координатах « $t_{\max} - S_{\max}^n$ ». Лучи, исходящие из начала координат, характеризуют процессы деформирования с определенным коэффициентом жесткости α , равным тангенсу угла наклона луча в данной системе координат.

Параметр S_{\max}^n , вычисляемый по второй теории прочности, характеризует условия хрупкого разрушения, параметр t_{\max} характеризует условия разрушения пластичного материала по третьей теории прочности. Таким образом, коэффициент $\alpha = t_{\max}/S_{\max}^n$ характеризует то, насколько данное напряженное состояние способствует пластическому (t_{\max}) или хрупкому S_{\max}^n разрушению.

Параметр S_{\max}^n и коэффициент жесткости в форме $\alpha = t_{\max}/S_{\max}^n$ применяются достаточно редко. Значительно чаще используются другие варианты записи коэффициента жесткости напряженного состояния. Так, Я.Б. Фрийдман в работе [11] приводит коэффициент В.А. Бабичкова – $K = S_n/t_n$, где S_n – среднее нормальное (гидростатическое) напряжение; t_n – октаэдрическое касательное напряжение. Данное соотношение (в некоторых случаях вместо t_n используют интенсивность напряжений σ_i) применяется достаточно широко [9, 14, 15, 17], в том числе – при оценке влияния степени жесткости напряженного состояния на характеристики пластичности материалов.

Так, в работах [14, 17] показано, что зависимость характеристик пластичности материала (критической деформации при кратковременном статическом растяжении, размаха деформации при малоциклового усталости и др.) от параметра жесткости напряженного состояния (S_n/σ_i) носит экспоненциальный характер.

Аналогичные зависимости представлены в работе [15] для растяжения образцов при воздействии высокого гидростатического давления (рис. 2).

Таким образом, коэффициент жесткости в виде отношения S_n/t_n , обратного ему соотношения

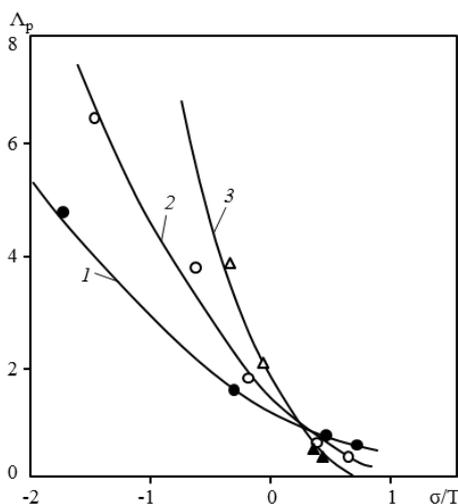


Рис. 2. Диаграммы пластичности для высокоуглеродистой стали в «сыром» (1), отожженном (2) и закаленном состоянии (3): σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность напряжений; Λ_p – предельная степень деформации сдвига [15]

t_n/S_n или t_{\max}/S_n (так как отличие t_{\max} от t_n незначительно [9]), предпочтительнее коэффициента $\alpha = t_{\max}/S_{\max}^n$, поскольку характеризует пластические свойства материала при данном напряженном состоянии и применяется в ряде критериев прочности, что дает возможность адаптировать теорию Я.Б. Фридмана к современным методикам прочностного расчета.

Кроме того, учет в коэффициенте жесткости гидростатического напряжения S_n предполагает представление левой части диаграммы механического состояния (рис. 1) в координатах « S_n – t_{\max} », что позволит по-новому интерпретировать введенные Я.Б. Фридманом критерии прочности материала ($S_{\text{отр}}$ и t_k).

Так, в качестве условия прочности различных материалов – в том числе материалов с дефектами – в ряде случаев используется условие Кулона–Мора [9], которое представляет собой зависимость касательного напряжения от нормального напряжения, действующего на площадке сдвига в момент разрушения: $\tau = f(\sigma)$. Данная зависимость хорошо описывает условие прочности дисперсных сред с различной степенью связности [18, 19]. По аналогии, исходя из представлений о том, что материал изначально содержит или приобретает в процессе нагружения определенное количество дефектов [9], условие прочности в виде двух прямых $S_{\text{отр}} = \text{const}$ и $t_k = \text{const}$ может быть заменено на единую кривую $t_{\max} = f(S_n)$, отражающую влияние гидростатического напряжения S_n на пластичность материала и условия развития в нем несплошностей (пор, трещин), что позволит использовать при описании процесса разрушения хорошо разработанный аппарат механики деформируемого твердого тела [20, 21].

Так, при описании условий разрушения при большом положительном значении S_n (трехосное растяжение), полагая, что к моменту разрушения в материале сформировался ансамбль случайным

образом ориентированных трещиноподобных дефектов [9], можно ожидать, что моменту разрушения будет соответствовать достижение в вершине какой-либо трещины коэффициентом интенсивности напряжений K_I критического значения K_{Ic} [20].

В случае больших отрицательных значений S_n (трехосное сжатие) следует предполагать, что распространение трещин будет происходить по механизмам поперечного и продольного сдвига (чему соответствуют коэффициенты K_{II} и K_{III}) в поле сжимающих напряжений, препятствующих взаимному смещению берегов трещины. В этом случае можно воспользоваться, например, моделью (рис. 3) [20], согласно которой для вычисления коэффициента интенсивности напряжений используется формула:

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi l} [(k/\sigma - \rho) + 0,5(\sin 2\alpha + \rho \cdot \cos 2\alpha)],$$

где k и ρ – параметры трения Кулона, а закон взаимодействия берегов трещины длиной l под воздействием сжимающих напряжений σ имеет вид: $\tau = -k + \rho \cdot \sigma$ [20], аналогичный условию Кулона–Мора [18, 19], что также подтверждает справедливость представления условия разрушения в форме $t_{\max} = f(S_n)$.

Таким образом, условие прочности Я.Б. Фридмана, содержащее два феноменологических критерия – $S_{\text{отр}}$ и t_k , можно заменить единой кривой $t_{\max} = f(S_n)$, описывающей условия распространения дефектов материала (трещин, пор) в зависимости от гидростатической составляющей тензора напряжений и степени деформации сдвига.

Влияние пластичности материала на его прочность

Из анализа правой части рис. 1 следует, что существует некоторое критическое значение коэффициента жесткости α , соответствующее переходу

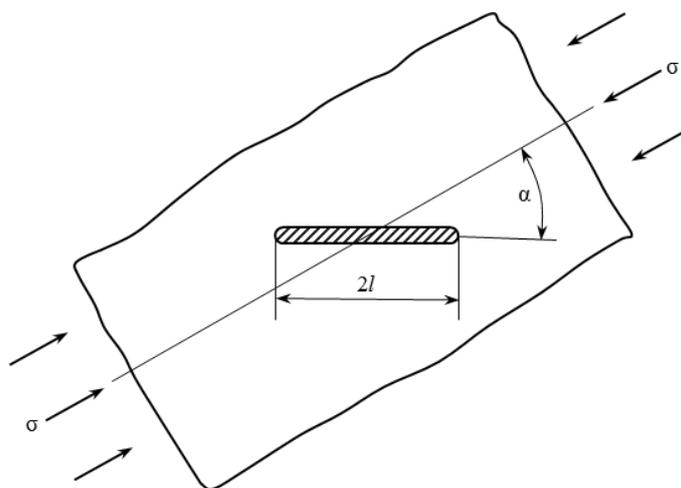


Рис. 3. Трещина при поперечном сдвиге в поле сжимающих напряжений [20]

данного материала из пластического состояния в хрупкое. При этом критическое значение α определяется уровнем механических свойств материала.

Так, на рис. 2 показано, что для различных структурно-фазовых состояний высокоуглеродистой стали одного химического состава критическое значение коэффициента жесткости α , представленного в форме S_n/σ_s , меняется, причем наименьшим критическим значением α обладает материал в закаленном состоянии.

Аналогично можно показать, что для материалов, которые подвергаются упрочняющей деформационной и/или термической обработке с изменением параметров элементов микроструктуры, при данном коэффициенте жесткости существует некоторый критический уровень характеристик пластичности материала (определяемых, например, при одноосном растяжении), при котором также происходит переход из пластического состояния в хрупкое.

Рассмотрим левую часть диаграммы механического состояния материалов (рис. 4) – позиции с римскими цифрами показывают уровень максимальных касательных напряжений, соответствующих разрушению материалов А, Б и В (см. рис. 1) при нагружении вдавливанием (1), одноосным сжатием (2) и одноосным растяжением (4). Для нагружений 1, 2 и 4 построим зависимость t_{max} от вида материала (рис. 5). Видно, что для данного вида напряженного состояния при изменении пластичности материала (различия между механическими характеристиками материалов А, Б и В показаны в правой части рис. 1, при этом материал В при наименьших прочностных характеристиках обладает максимальными характеристиками

ми пластичности) кривая зависимости t_{max} от вида материала, обладающего определенной совокупностью механических характеристик, в общем случае имеет вид кривой с максимумом. Кривая 1 (рис. 5), соответствующая вдавливанию, представляет собой частный случай, для которого максимум при данной совокупности физико-механических характеристик не достигается.

Рассмотрим некоторые примеры.

В качестве модельной системы для описания свойств двухфазных структур, состоящих из частиц упрочняющей фазы, разделенных прослойками из мягкой матрицы, удобно использовать твердые сплавы системы WC-Co, поскольку свойства данных материалов подробно описаны [22–24], причем закономерности изменения механических свойств данных сплавов в зависимости от параметров микроструктуры аналогичны полученным на различных сталях [22, 24].

Автор работы [22] в качестве структурного параметра, характеризующего пластичность твердых сплавов, использует толщину прослойки кобальтовой фазы (Co-прослойки) между зернами WC-фазы. Зависимость характеристик прочности от толщины Co-прослойки (кривая прочности) имеет вид кривой с максимумом, аналогичной представленной на рис. 5. На рис. 6, а показана кривая прочности при трехточечном изгибе в зависимости от содержания кобальта, определяющего толщину Co-прослойки, при данном среднем размере карбидных зерен. На участке кривой справа от точки максимума прочность при уменьшении толщины Co-прослойки возрастает (участок упрочнения), слева от точки максимума

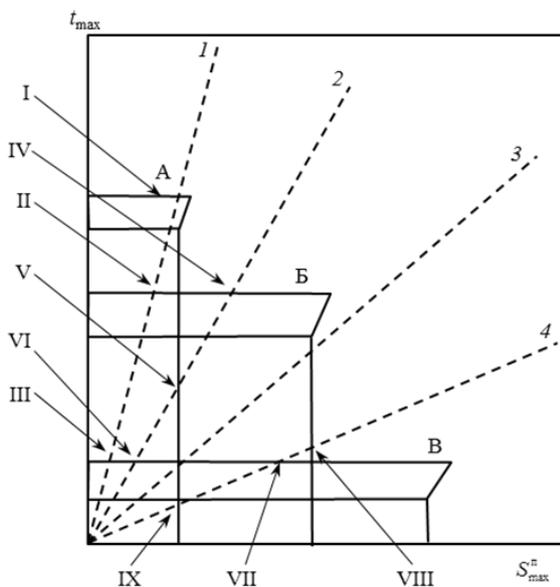


Рис. 4. Левая часть диаграммы механического состояния материалов (см. рис. 1)

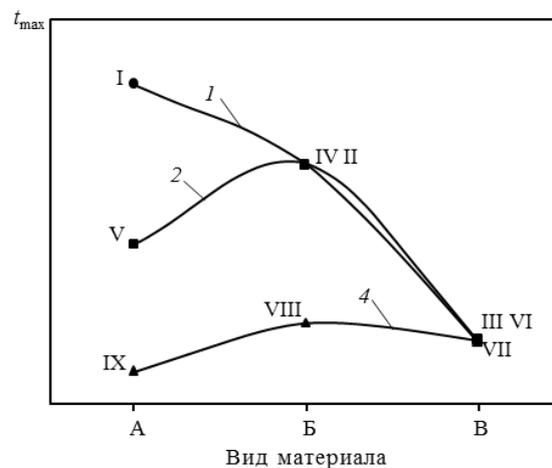


Рис. 5. Зависимость t_{max} от вида материала при нагружении вдавливанием (1), одноосным сжатием (2) и одноосным растяжением (4)

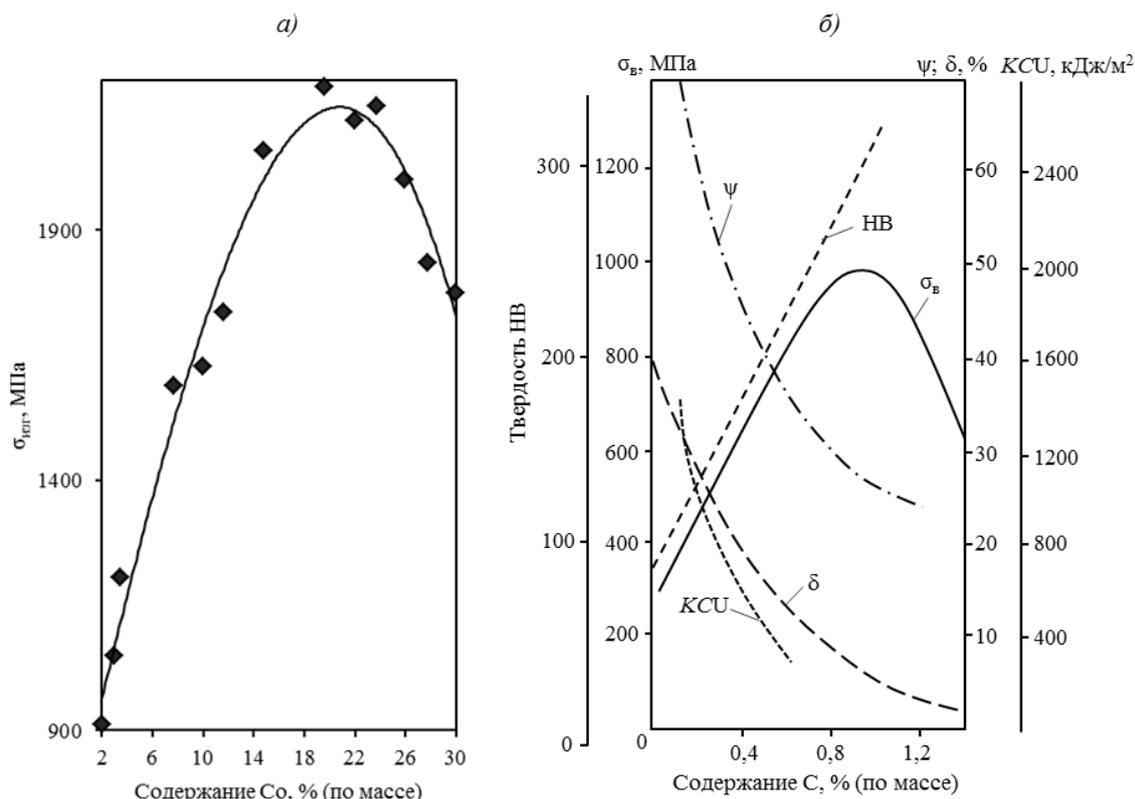


Рис. 6. Кривые прочности при температуре испытаний 20°C:
 а – для твердого сплава системы WC–Co при изгибе, средний размер карбидных зерен 1,7 мкм (по данным работы [22]); б – для горячекатаной стали [25]

Зависимость концентрации Со-фазы, соответствующей точке перегиба на кривой прочности, от вида испытаний [22]

Вид испытаний	Концентрация Со-фазы, соответствующая точке перегиба, % (по массе)	Прочность, соответствующая точке перегиба, МПа
Растяжение	~25	1000–1200
Четырехточечный изгиб	~10	1600–2000
Одноосное сжатие	~5	4500–5000

прочность при уменьшении толщины Со-прослойки снижается (участок охрупчивания).

Кривые прочности, полученные при испытаниях твердых сплавов в широком диапазоне содержания Со-фазы на растяжение, четырехточечный изгиб и кручение имеют аналогичную форму с максимумом. Аналогичный вид имеют кривые прочности для сплавов с постоянным содержанием Со-фазы, но различным средним размером зерна WC-фазы, определяющим толщину Со-прослойки.

Согласно работам [22, 24], сплавы, соответствующие правой ветви кривой прочности, ведут себя как классические дисперсноупрочненные материалы, свойства которых описываются моделями Орована и Анселла–Ленела. Однако при уменьшении толщины Со-прослойки возрастает вклад гидростатической составляющей вследствие эффекта стеснения поперечной деформации в тонких прослойках [24] и увеличения термических напряжений [23].

При определенной толщине Со-прослойки, соответствующей точке перегиба кривой прочности, происходит переход от сплавов с существенной (хотя и малой) остаточной деформацией до разрушения к сплавам, в которых макроскопическая остаточная деформация ничтожно мала (левая ветвь кривой прочности или участок охрупчивания). В точке перегиба при данном виде нагружения предел текучести становится равным пределу прочности и все сплавы, лежащие слева от точки перегиба, разрушаются хрупко [22].

Положение точки перегиба на кривой прочности зависит от вида испытаний, т. е. определяется видом напряженного состояния. В таблице даны значения концентрации Со-фазы, соответствующей максимуму на кривой прочности, для различных видов испытаний (при одинаковом среднем размере карбидных зерен).

По данным таблицы, точка перегиба смещается в сторону уменьшения концентрации Со-фазы

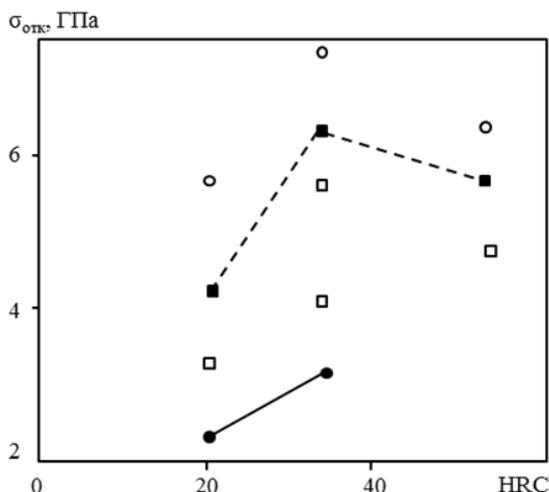


Рис. 7. Влияние термической обработки на откольную прочность стали 40X при характерном времени нагружения $1,3 \cdot 10^{-6}$ с:

● – отсутствие повреждений; □ – начальная стадия макроповреждений; ■ – начальная стадия макроразрушения, определяемая визуально; ○ – полное макроскопическое разрушение образца (сплошная и штриховая линии соответствуют стадиям начала разрушения и полного разрушения соответственно) [26]

(уменьшения толщины Со-прослойки, т. е. параметра пластичности) при уменьшении жесткости напряженного состояния. Кривая твердости, соответствующая наиболее мягкому напряженному состоянию при всестороннем неравномерном сжатии, для сплавов исследованных составов перегиба не имеет и монотонно возрастает с уменьшением толщины Со-прослойки – аналогично кривой 1 на рис. 5.

Из данных таблицы также следует, что прочность, соответствующая точке перегиба, снижается при увеличении жесткости напряженного состояния, что также соответствует графикам, представленным на рис. 5, и рассмотренному ранее влиянию гидростатической составляющей тензора напряжений на условия разрушения материала.

На рис. 6, б представлены диаграммы прочности горячекатаной углеродистой стали при комнатной температуре [25]. С увеличением количества углерода в стали уменьшается содержание мягких ферритных прослоек, что качественно аналогично уменьшению толщины Со-прослоек в твердом сплаве. Таким образом, диаграммы прочности, представленные на рис. 6, б, зеркальны по отношению к диаграмме прочности Г.С. Креймера (рис. 6, а) и графикам на рис. 5. Кривые прочности для стали данного химического состава, прошедшей термическую обработку на различную твердость, имеют аналогичный вид.

Из данных рис. 6, б следует, что зависимость расположения точки перегиба на кривой прочности от вида напряженного состояния для углеродистой стали аналогична соответствующей зависимости для твердых сплавов. Так, на кривой прочности для одноосного растяжения существует явный перегиб, тогда как на кривой твердости перегиб отсутствует и данная кривая представлена только участком упрочне-

ния. Кривая ударной вязкости, напротив, представлена только участком охрупчивания, поскольку в этом виде испытаний кроме жесткого напряженного состояния действует фактор скорости, также снижающий характеристики пластичности [12].

Таким образом, для данного коэффициента жесткости существует критическое значение параметра пластичности, при котором происходит переход материала из вязкого состояния в хрупкое, что подтверждает выводы из теории Я.Б. Фридмана (рис. 5).

Хотя теория Я.Б. Фридмана и не рассматривает случай высокоскоростного нагружения, следует отметить, что кривые прочности при высокоскоростном нагружении имеют вид, аналогичный рассмотренным кривым прочности при кратковременном статическом нагружении. На рис. 7 представлена зависимость откольной прочности от твердости для стали 40X [26]. Видно, что при указанных параметрах высокоскоростного нагружения повышение твердости стали >35 HRC снижает откольную прочность, что свидетельствует о недостаточной пластичности материала с твердостью >35 HRC при данном виде нагружения.

Приведенные данные свидетельствуют об общей для различных металлических материалов фундаментальной зависимости прочности при данном виде нагружения (напряженного состояния) от пластичности, которая также описывается в теории Я.Б. Фридмана.

Заключения

Таким образом, показано, что объединенная теория прочности Я.Б. Фридмана удовлетворительно описывает закономерности разрушения материалов в различных напряженных состояниях – в том числе с учетом структурно-фазового

состояния материала, и до настоящего времени не утратила своего значения. Так, одним из приложений объединенной теории прочности может служить оценка критического значения параметра пластичности, соответствующего переходу материала из пластического состояния в хрупкое при данном коэффициенте жесткости напряженного состояния.

Для актуализации описания критериев прочности теории Я.Б. Фридмана с учетом положений механики разрушения и адаптации их к современным методикам прочностных расчетов, необходи-

мо при построении диаграммы механического состояния использовать вместо максимальных «приведенных» растягивающих напряжений среднее нормальное (гидростатическое) напряжение. При этом условие прочности будет представлено в виде единой зависимости $t_{\max} = f(S_n)$, а коэффициент жесткости напряженного состояния – в форме t_{\max}/S_n .

Для подтверждения выдвинутых предположений потребуется проведение дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2016).
5. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В. Влияние термомеханической обработки на структуру и свойства аустенитных сталей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2016).
6. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №10. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2016).
7. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1993. 640 с.
8. Гриневиц А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-10-10.
9. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 416 с.
10. Фридман Я.Б. Деформация и разрушение металлов при статических и ударных нагрузках. М.: Гос. изд-во оборон. пр-ти, 1946. 228 с.
11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов в 2 ч. М.: Машиностроение, 1974. Ч. I. Деформация и разрушение. 472 с.
12. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. Л.: НКТП СССР, 1936. 396 с.
13. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
14. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
15. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия. 1970. 229 с.
16. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. 2015. №3. С. 42–47.
17. Хажинский Г.М. Модели деформирования и разрушения металлов. М.: Научный мир, 2011. 231 с.
18. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Физматлит, 1960. 241 с.
19. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. М.: Металлургия. 1979. 232 с.
20. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
21. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
22. Креймер Г.С. Прочность твердых сплавов. М.: Металлургия, 1971. 248 с.
23. Чапорова И.Н., Чернявский К.С. Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 248 с.
24. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Мир, 1970. 672 с.
25. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
26. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.