

УСЛОВИЯ ХРУПКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. И. Тарасенко, Е. Н. Тарасенко

Как известно, вязкая прочность характеризуется сопротивлением материала сдвигу $S_{\text{сдв}}$, а хрупкая прочность — сопротивлением материала отрыву $S_{\text{отр}}$. При сложном напряженном состоянии критерии вязкой и хрупкой прочности материала являются функциями всех трех истинных напряжений S_1 , S_2 и S_3 . Если функции от S_1 , S_2 , S_3 , выражающие сопротивление сдвигу и отрыву, выбраны правильно, то упомянутые критерии прочности для данного материала и его физического состояния перед нагружением будут постоянными, не зависящими от вида напряженного состояния

$$f(S_1, S_2, S_3) = S_{\text{сдв}} = \text{const}, \quad (1)$$

$$F(S_1, S_2, S_3) = S_{\text{отр}} = \text{const}. \quad (2)$$

Вид функции (1) для оценки вязкой прочности материалов был предложен нами в предыдущих работах [1, 2].

Разрушение путем отрыва и путем сдвига происходит вследствие нарушения сцепления между элементарными частицами материала. Силы сцепления зависят от расстояний между частицами. Следовательно, разделение материала на части (разрушение) возможно только при увеличении расстояний между его частицами, а не уменьшении этих расстояний.

Разрушение изотропного твердого тела при равномерном трехосном сжатии невозможно. В условиях неравномерного трехосного сжатия, когда хотя бы одно из главных относительных удлинений имеет положительный знак, разрушение изотропного твердого тела становится возможным. При этом, как известно, все материалы без исключения проявляют склонность к вязкому разрушению путем сдвига. Эта замечательная особенность неравномерного трехосного сжатия используется практически для изучения пластичности и определения сопротивления сдвигу хрупких материалов [3, 4].

Левые части соотношений (1) и (2) выражают расчетные напряжения при сложном напряженном состоянии. Им отвечают определенные расчетные деформации. Определяя на всех стадиях деформирования расчетные напряжения и соответствующие расчетные деформации, можно построить кривые деформирования материала. Эти кривые для данного материала и его физического состояния перед нагружением будут при всех напряженных состояниях совпадать, т. е. будут являться обобщенными кривыми, если расчетные напряжения и деформации определены правильно. Таким образом, критериям проч-

ности (1) и (2), выраженным в напряжениях, будут соответствовать определенные критические деформации, которые сами по себе тоже являются деформационными критериями соответственно вязкой и хрупкой прочности материала.

В одной из работ [5] показано, что не только вторая теория, но также третья и четвертая теории прочности исходят из условия постоянства соответствующих деформаций. Третья теория требует постоянства максимального сдвига, а четвертая — постоянства октаэдрического сдвига.

Возникает вопрос: какие деформации приводят материал к разрушению — упругие, пластические или полные? Экспериментальные исследования показывают, что на любой стадии пластического течения твердых тел не происходит остаточного изменения объема. В процессе пластического деформирования происходит лишь изменение формы, которое сопровождается незначительным упругим изменением объема. Величины пластических деформаций многих металлов достигают иногда очень больших значений. Если бы пластические деформации отражали изменение расстояний между элементарными частицами материала, то нарушение сил связи (сцепления) между частицами наступало гораздо раньше и пластические деформации в момент разрушения были бы незначительными, сравнимыми с упругими деформациями. Следовательно, при пластическом деформировании происходит перегруппировка элементарных частиц без заметного нарушения сил сцепления, связанных с изменением расстояний между элементарными частицами (ионами). Более того, в процессе пластической деформации, как известно, происходит образование дисперсных твердых частиц и изменение структуры материала, в результате чего материал упрочняется, но все эти явления связаны с перегруппировкой частиц, а не с изменением расстояний между ними. Схематически перегруппировка частиц при пластической деформации представлена на рис. 1.

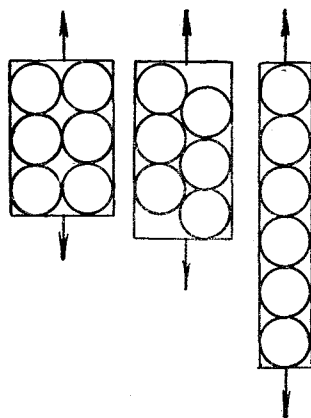


Рис. 1.

Изменение расстояний между элементарными частицами, а следовательно, и нарушение сил сцепления (притяжения), по-видимому, характеризуется только упругими деформациями, которые связаны с изменением объема материала.

Таким образом, если исходить из деформированного состояния, то при оценке хрупкой прочности (а может быть и вязкой) необходимо учитывать только упругие деформации.

Для оценки прочности материала в хрупком состоянии в настоящее время [6, 7] обычно исходят из условия постоянства максимального главного напряжения (по первой теории) или условия постоянства максимальной упругой деформации (по второй теории)

$$\sigma_1 = \text{const}, \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = \text{const} \text{ или } \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) = \text{const}. \quad (4)$$

Недостатком первой теории прочности (3) является отсутствие учета влияния на прочность второго и третьего главных напряжений.

Следовательно, данная теория, базируясь на рассмотрении напряженного состояния, не полно характеризует напряженное состояние и служить критерием хрупкой прочности материала не может. Эта теория, как известно, противоречит опытным данным, что, с нашей точки зрения, является вполне закономерным.

Вторая теория, исходя из деформированного состояния материала $\varepsilon_1 = \text{const}$, не полно отражает деформированное состояние, так как не учитывает двух других деформаций ε_2 и ε_3 , которые должны оказывать некоторое влияние на прочность хрупкого материала.

Первая и вторая теории, кроме отмеченных недостатков, имеют и другие недостатки. Так, например, они не учитывают влияния на сопротивление материала отрыву среднего главного напряжения (шарового тензора). Влияние последнего на хрупкую прочность материала, очевидно, даже более значительно, чем на вязкую.

Первая теория прочности не учитывает влияния на сопротивление материала отрыву вида девиатора напряжений, вторая — вида девиатора деформаций. Девиаторы напряжений и деформаций можно характеризовать известными коэффициентами Лоде

$$\mu^* = \frac{S_2 - \frac{1}{2}(S_1 + S_3)}{\frac{1}{2}(S_1 - S_3)}; \quad (5)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_2 - \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}. \quad (6)$$

Геометрически коэффициенты μ^* и ν соответственно выражают относительное расположение двух меньших кругов напряжений или деформаций относительно большего. Эти коэффициенты являются количественными характеристиками напряженного и деформированного состояний соответственно.

Если

$$\mu^* = \nu, \quad (7)$$

то круги напряжений подобны кругам деформаций. Равенство (7) выражает известный закон подобия девиаторов напряжений и деформаций. В координатных осях μ^* и ν этот закон представится прямой линией (рис. 2). Однако, как показали опыты Девиса [8, 9] и

других исследователей, закон подобия девиаторов (7) выполняется только для частных напряженных состояний, когда $\mu^* = 1$, $\mu^* = 0$, $\mu^* = -1$, во всех остальных случаях — нарушается (рис. 2).

Если исходить из рассмотрения напряженного состояния, учитывая преимущественное влияние на сопротивление отрыву максимального главного напряжения S_1 , а также влияние среднего напряжения

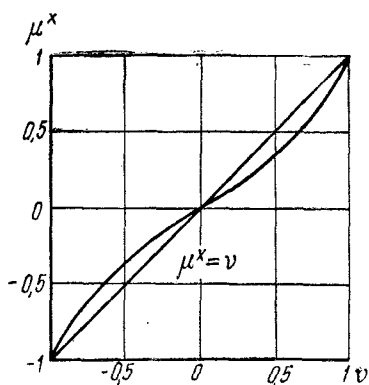


Рис. 2.

и коэффициента μ^* , то в первом приближении критерий хрупкой прочности материала можно представить в форме

$$S_i = S_1 + kS + lS \sin \pi \mu^*, \quad (8)$$

где S_i — расчетное напряжение;

k, l — константы материала, определяемые по опытным данным;

S — среднее нормальное напряжение

$$S = \frac{1}{3} (S_1 + S_2 + S_3).$$

При малых пластических деформациях истинные напряжения S будут совпадать с условными σ . Следовательно, расчетное напряжение

$$\sigma_i = \sigma_1 + k\sigma + l\sigma \sin \pi \mu^*. \quad (9)$$

В частных случаях, когда $\mu^* = 1; 0; -1$, критерий хрупкой прочности (8) принимает простой вид

$$S_i = S_1 + kS = m. \quad (10)$$

Константы материала k, m определяются по результатам испытаний на два вида напряженного состояния. Если за исходные испытания принять одноосное растяжение и одноосное сжатие, то будем иметь

$$\left. \begin{aligned} S_p + k \frac{S_p}{3} = m; \quad -k \frac{S_c}{3} = m; \\ k = -\frac{3S_p}{S_p + S_c} = -3 \frac{\beta}{1 + \beta}; \quad m = \frac{S_p S_c}{S_p + S_c} = \frac{S_p}{1 + \beta}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

После подстановки постоянных и алгебраических преобразований частный критерий хрупкой прочности (10) представится в окончательном виде

$$S_1 - \beta (S_2 + S_3) = S_p, \quad (12)$$

где β — отношение сопротивления материала растяжению S_p к сопротивлению материала сжатию S_c

$$\beta = \frac{S_p}{S_c}. \quad (13)$$

Условие прочности материала в хрупком состоянии на основе (12)

$$\sigma_1 - \beta (\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]_p. \quad (14)$$

Деформационный критерий хрупкой прочности при учете преимущественного влияния максимального относительного удлинения, а также влияния объемной деформации ϵ , и коэффициента ν можно представить в виде

$$\epsilon_1 + a \epsilon_v + b \epsilon_v \sin \pi \nu = c. \quad (15)$$

Экспериментальные исследования показали, что на любой стадии пластического деформирования материала упругие деформации под-

чиняются закону Гука. Следовательно, максимальное упругое относительное удлинение ε_1 и объемная деформация ε_v всегда равны

$$\varepsilon_1 = \frac{S_1 - \mu(S_2 + S_3)}{E}, \quad \varepsilon_v = \frac{1 - 2\mu}{3E}(S_1 + S_2 + S_3), \quad (16)$$

где S_1, S_2, S_3 — главные истинные напряжения;
 E, μ — упругие постоянные материалы.

В тех случаях, когда $\mu^* = 1; 0; -1$, деформационный критерий хрупкой прочности примет вид

$$\varepsilon_1 + a\varepsilon_v = c. \quad (17)$$

После постановки выражений для деформаций (16) в соотношение (17) получаем

$$\frac{S_1 - \mu(S_2 + S_3)}{E} + \frac{a(1 - 2\mu)}{3E}(S_1 + S_2 + S_3) = c. \quad (18)$$

Константы материала a и c определяются путем испытаний образцов на два вида напряженного состояния. Если известны результаты испытаний на одноосное растяжение и одноосное сжатие, то

$$a = \frac{3(\mu S_c - S_p)}{(1 - 2\mu)(S_p + S_c)}; \quad c = \frac{(1 + \mu)S_p S_c}{E(S_p + S_c)} \quad (19)$$

и соотношение (18) принимает следующую форму

$$S_1 - \mu(S_2 + S_3) + \frac{\mu S_c - S_p}{S_p + S_c}(S_1 + S_2 + S_3) = (1 + \mu) \frac{S_p S_c}{S_p + S_c}. \quad (20)$$

После преобразований расчетное напряжение при сложном напряженном состоянии S_p , приведенное к сопротивлению материала отрыву при одноосном растяжении, принимает очень простой вид

$$S_i = S_1 - \beta(S_2 + S_3) = S_p. \quad (21)$$

Условие прочности на основе этого соотношения

$$\sigma_1 - \beta(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]_p \quad (22)$$

совпадает с полученным выше условием прочности (14) и по своей форме не сложнее, чем условие прочности по второй теории

$$\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma], \quad (23)$$

но существенно отличается от последнего.

Из (22), как частные случаи, вытекают условия прочности по второй и третьей теориям, а также по теории прочности Мора.

При $\beta = \mu$, т. е. когда отношение сопротивления растяжению к сопротивлению сжатию совпадает с величиной коэффициента Пуассона, условие прочности (22) будет совпадать с условием прочности (23) по второй теории.

При $\beta = 1$ и $\sigma_2 = 0$, т. е. для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию при плоских напряженных состояниях, когда $\sigma_2 = 0$, условие прочности (23) совпадает с условием прочности по третьей теории

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]_p. \quad (24)$$

Для тех видов плоскости напряженных состояний, когда $\sigma_2 = 0$ и $\beta \neq 1$, предлагаемое условие (23) совпадает с условием прочности Мора

$$\sigma_1 - \beta \sigma_3 \leq [\sigma]_p; \quad \beta = \frac{\sigma_p}{\sigma_c} = \frac{[\sigma]_p}{[\sigma]_c}. \quad (25)$$

Как известно, для материалов и напряженных состояний, при которых условие (18) совпадает с условием по третьей теории, последняя хорошо согласуется с опытными данными, а для материалов, неодинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию при напряженных состояниях, в которых $\sigma_2 = 0$, т. е. когда условие прочности (23) совпадает с условием по теории Мора, последняя также хорошо согласуется с опытами [2, 8]. Следовательно, предлагаемое условие прочности (23), а значит, и критерий прочности (21) можно применять для оценки хрупкой прочности материалов.

Параметр β можно определять не только по результатам испытаний материала на растяжение и сжатие, но и путем испытаний материала на два любых напряженных состояния.

Сопротивление чистому сдвигу из (23) и (24)

$$t_{cd} = \frac{S_p S_c}{S_p + S_c} = \frac{1}{1 + \beta} S_p = \alpha S_p; \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \beta}. \quad (27)$$

Если за исходные испытания принять простое растяжение и чистый сдвиг, то параметр β будет определяться соотношением

$$\beta = \frac{S_p}{t_{cd}} - 1. \quad (28)$$

Тогда сопротивление материала одноосному сжатию

$$S_c = \frac{S_p}{\beta} = \frac{S_p}{\frac{S_p}{t_{cd}} - 1}. \quad (29)$$

Для экспериментальной проверки критерия прочности (21) в применении к случаям вязкого разрушения были использованы опыты, описанные в работе [2]. В табл. 1 приведены результаты сравнительных испытаний ряда материалов по определению пределов текучести при растяжении, сжатии и кручении. Удовлетворительное совпадение опытных величин коэффициентов $\alpha = \frac{t_{кр}}{S_p}$ с теоретическими по формуле (27) подтверждает предлагаемый критерий прочности (21) в применении к оценке прочности пластически деформируемых материалов.

Для экспериментальной проверки предлагаемого критерия прочности (21) применительно к хрупким материалам были использованы опыты Кармана и Бокера по определению пределов пропорциональности и упругости мрамора и песчаника при различных видах трехосного неравномерного сжатия [10]. Результаты указанных опытов приведены в табл. 2. Расчетные напряжения по формуле (21), как видно из табл. 2, при разных напряженных состояниях сохраняют прибли-

женно постоянное значение. Максимальные отклонения от средних величин расчетных напряжений не превышают 6%. Среднее отклонение составляет 2%.

Таблица 1

Материал	Состояние материала	Предел текучести			$\beta = \frac{S_p}{S_c}$	Коэффициент	
		S_p	S_c	$t_{кр}$		$\alpha_{оп}$	$\alpha = \frac{1}{1+\beta}$
Алюминий	Отожженный	4,40	4,10	2,15	1,07	0,490	0,488
Медь	"	5,95	5,82	2,92	1,02	0,490	0,495
Латунь	В состоянии поставки	22,70	20,80	10,93	1,09	0,482	0,478
Ст. 3	"	21,80	22,00	11,00	0,99	0,505	0,502
Ст. 4	"	24,20	26,20	12,50	0,915	0,517	0,522
Ст. 5	"	28,00	30,00	14,40	0,925	0,515	0,519
Ст. 6	"	31,40	35,00	16,90	0,898	0,538	0,527
Ст. 7	Нормализованная	42,00	51,20	22,70	0,820	0,540	0,550
Констр. сталь	Закалка—отпуск 600°	60,40	90,70	36,20	0,666	0,600	0,600
То же	Закалка—отпуск 400°	87,30	177,20	57,60	0,492	0,660	0,668

Таким образом, предлагаемый критерий хрупкой прочности (21) удовлетворительно согласуется с опытными данными и может быть использован для практических расчетов на прочность хрупких материалов.

Таблица 2

Материал	Главное напряжение, кг/см ²			$\beta = \frac{S_p}{S_c}$	Расчетное напряжение $\sigma_i = \sigma_1 - \beta \times (\sigma_2 + \sigma_3)$	Отклонение от среднего σ_i , %	Опыт
	σ_1	σ_2	σ_3				
Мрамор	Предел пропорциональности						Кармана
	0	0	—1100	0,292	322	—5	
	—235	—235	—1735	"	341	—1	
	—500	—500	—2400	"	348	—3	
	—685	—685	—2885	"	358	—6	
	—845	—845	—3145	"	322	—5	
Мрамор	Предел упругости						Кармана
	0	0	—1360	0,239	325	—6	
	—235	—235	—2335	"	368	—6	
	—500	—500	—3150	"	370	—6	
	—685	—685	—3565	"	335	—3	
	—845	—845	—4050	"	325	—6	

Материал	Главное напряжение, кг/см ²			$\beta = \frac{S_p}{S_c}$	Расчетное напряжение $\sigma_i = \sigma_1 - \beta \times (\sigma_2 + \sigma_3)$	Отклонение от среднего σ_i , %	Опыт
	σ_1	σ_2	σ_3				
Песчаник	Предел пропорциональности						Кармана
	0	0	— 600	0,258	155	0	
	—280	—280	—1400	„	154	—0,5	
	—555	—555	—2200	„	156	—0,5	
Мрамор	Предел упругости						Бокера
	—1320	—5480	—5480	0,242	1330	—1	
	—1080	—5020	—5020	„	1350	—3	
	— 850	—4510	—4510	„	1330	—1	
	— 665	—3599	—3599	„	1265	—3,5	
	— 595	—3850	—3850	„	1270	—3	

В табл. 3 приводятся результаты опытов Н. Н. Давиденкова и А. Н. Ставрогина [11, 12] по испытанию тонкостенных гипсовых трубок, подверженных действию внутреннего давления и осевого растяжения или сжатия. Во всех случаях гипсовые трубки доводились до разрушения. Разрушение при одноосном и двухосном растяжениях происходило путем отрыва. При плоских напряженных состояниях, когда одно из главных напряжений растягивающее, а другое сжимающее, вплоть до $\sigma_3 = -110$ кг/см², разрушение также происходило путем отрыва. Однако при дальнейшем увеличении сжимающего напряжения в некоторых случаях разрушение происходило путем сдвига. При одноосном сжатии, согласно данным работ [11, 12], разрушение носило определенный характер сдвига.

Как видно из табл. 3, расчетное разрушающее напряжение с переходом от одноосного растяжения через различные виды плоского напряженного состояния к одноосному сжатию по первой теории понижается от 42 кг/см² до 0; по второй (коэффициент Пуассона $\mu = 0,22$) — постепенно возрастает; по предлагаемому нами условию (8) сохраняет постоянное значение, близкое к расчетному сопротивлению материала отрыву при осевом растяжении 36,9 кг/см². Отношения расчетных напряжений к соответствующим расчетным значениям сопротивления материала отрыву при простом растяжении в табл. 3 даны по первой и второй теориям и предлагаемому условию (8). Эти отношения показывают, что первая теория при наличии сжимающих напряжений дает большое расхождение с опытом. Одноосное сжатие вообще для этой теории является особой точкой. Вторая теория также не согласуется с экспериментальными данными. Наибольшее расхождение второй теории с опытом составляет 72%, при одноосном сжатии — 57%. По предлагаемому условию (8) наибольшее отклонение расчетного разрушающего напряжения от расчетного сопротивления гипса отрыву при осевом растяжении составляет всего лишь 7%.

Следовательно, критерий прочности, выраженный уравнением (8), достаточно хорошо согласуется с опытными данными табл. 3.

Таблица 3

Разрушающее напряжение, кг/см ²			Расчетное напряжение по теориям прочности, (кг/см ²)			Отношение расчетного напряжения к расчетному сопротивлению отрыву при растяжении по теориям		
σ_1	σ_2	σ_3	первой	второй	уравне- нию (8)	первой	второй	уравне- нию (8)
42	0	0	42	42	35,9	1	1	1
44	23	0	44	38,9	37,0	1,05	0,92	1
44	42	0	44	34,7	36,9	1,05	0,82	0,99
45	24	0	45	39,7	38,4	1,07	0,94	1,04
42	0	0	42	42	36,9	1	1	1
39	0	— 50	39	50	39,4	0,93	1,19	1,06
40	0	— 70	40	56,4	39,7	0,95	1,32	1,07
37	0	—135	37	66,7	36,8	0,88	1,59	1
20	0	—237	20	72,2	34,5	0,48	1,72	0,94
0	0	—300	0	66	36,9	0	1,57	1

Результаты совершенно аналогичных испытаний стеклянных тонкостенных трубок [11, 12] приводятся в табл. 4. Стеклянные трубки (так же как и гипсовые) доводились до разрушения, которое во всех случаях происходило путем отрыва. Из табл. 4 видно, что расчетное напряжение по второй теории (коэффициент Пуассона $\mu=0,23$) при увеличении сжимающего напряжения очень сильно возрастает и при одноосном сжатии в 4,93 раза превосходит сопротивление отрыву при растяжении. Таким образом, вторая теория и в данном случае несправедлива.

Таблица 4

Разрушающее напряжение, кг/см ²			Расчетное напряжение, кг/см ²			Отношение расчетного напряжения к расчетному сопротивлению отрыву при растяжении		
σ_1	σ_2	σ_3	по второй теории	по уравнению		по второй теории	по уравнению	
				(21)	(8)		(21)	(8)
420	0	0	420	420	392	1,02	1,02	1
410	260	0	350	400	398	0,85	0,98	1,01
400	380	0	313	382	384	0,76	0,93	0,98
400	320	0	326	385	392	0,79	0,94	1
400	200	0	354	391	373	0,86	0,95	0,95
400	0	0	400	400	392	0,98	0,98	1
380	0	— 750	552	415	375	1,35	1,01	0,96
400	0	—1650	780	477	414	1,90	1,16	1,05
0	0	—8750	2200	410	392	4,93	1	1

Расчетное напряжение по предлагаемому приближенному критерию прочности, выражаемому уравнением (21), удовлетворительно

согласуется с опытными данными, давая лишь в одном случае отклонение на 16%.

По предлагаемому уточненному критерию прочности, выраженному условием (8), расчетное напряжение во всех случаях остается величиной постоянной (наибольшее отклонение не превышает 5%).

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что уточненный критерий прочности — условие (8) — хорошо согласуется с опытными данными при хрупком, переходном и вязком состоянии материала (гипс). Повидимому, его можно рассматривать как единый критерий хрупкой и вязкой прочности материала. Однако в первом приближении достаточно удовлетворительно согласуется с опытными данными и приближенный критерий прочности (21). Для практических инженерных расчетов поэтому можно рекомендовать вытекающее из уравнения (21) условие прочности

$$\sigma_1 - \beta(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]_p; \quad \beta = \frac{\sigma_p}{\sigma_c},$$

дающее достаточно надежные результаты.

Использованная литература

1. Тарасенко И. И. О физических основах деформирования и разрушения металлов. Записки ЛГИ, 1954, т. XXIX, вып. 3.
2. Тарасенко И. И. и Тарасенко Е. Н. К вопросу о критериях пластичности и прочности металлов. Записки ЛГИ, 1956, т. XXXIII, вып. 3.
3. Karman T. Z. d. VDI, 1911.
4. Грозин Б. Д. Пластичность высокотвердых сталей. Автореферат докторской диссертации. Изд. АН УССР, 1949.
5. Тарасенко И. И. Об условии разрушения металлов. ЖТФ, 1951, т. XXI, вып. II.
6. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. Изд. АН СССР, 1950.
7. Фридман Я. Б. Единая теория прочности. Оборонгиз, 1943.
8. Теория пластичности. Сборник статей. Перевод с английского под редакцией Работнова Ю. Н. ГИИЛ, 1948.
9. Davis E. A. I. Appl. Mech.; 1943, B. 3.
10. Боткин А. И. О прочности сыпучих и хрупких материалов. Изв. НИИ гидротехники, 1940, № 26.
11. Давиденков Н. Н., Ставрогин А. Н. и Петрова Н. А. Критерии прочности при хрупком разрушении. ДАН СССР, 1954, т. XCIX, № 1.
12. Давиденков Н. Н. и Ставрогин А. Н. О критериях прочности при хрупком разрушении и плоском напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, 1954, № 8.