

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-9-18

А.В. Гриневич¹

СТАНОВЛЕНИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССОРА С.И. КИШКИНОЙ

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



С.И. Кишкина, 40-е годы XX века

Софья Исааковна Кишкина (Ратнер) вошла в первые ряды исследователей прочностных характеристик материалов, представив еще в середине прошлого века на суд научной общественности монографию «Прочность и пластичность металлов» [1]. В монографии Софья Исааковна подвергает анализу и критике основополагающие теории прочности того времени, разработанные такими учеными, как Треск, Сен-Венан, У. Губер, Мизес (критерий Губера–Мизеса), исследует сущность процесса пластической деформации, указывает на необходимость «...пересмотреть некоторые принципиальные положения науки о прочности и пластичности, приведя их в соответствие с опытом».

В предисловии к монографии «Прочность и пластичность металлов» Софья Исааковна отмечает, что *физический подход* к решению проблем прочности, опирающийся на изучение взаимодействия атомов с помощью волновых уравнений Шредингера для отдельных атомов, бессилён для отражения поведения совокупности «ионного скелета металлической решетки и окружающего его моря электронов». Она также показывает, что при *математическом подходе* к описанию процессов пластической деформации прибегают к целому ряду допущений, отдаляющих получен-

ные решения от реального поведения материалов. Так, сформулированное П. Людвигом положение о «независимости кривой течения от вида напряженного состояния» противоречит многим экспериментальным данным и «при решении задач, особенно связанных с областью значительных пластических деформаций, его следовало бы применять с большой осторожностью, а может быть и вообще от него отказаться».

С учетом ограниченных возможностей физического и математического подходов к предсказанию поведения материала в условиях сложного напряженного состояния, Софья Исааковна полагает, что наиболее продуктивным в вопросах прочности и пластичности материалов является *инженерно-технический подход*, базирующийся «на экспериментальном исследовании распределения напряжений и деформаций на различных стадиях процесса деформации при разных напряженных состояниях, температурах и скоростях, с целью установления определенных закономерностей, хотя бы в пределах ограниченной группы явлений». Она выделяет один из наиболее важных вопросов в проблеме прочности – это «вопрос о связи между напряжениями и деформациями в пластической области, о влиянии вида напряженного состояния на эту связь и о критериях, характеризующих наступление так называемых предельных состояний: текучести и разрушения».

Опираясь на большой экспериментальный опыт, Софья Исааковна приходит к выводу, что «в общем случае при любых способах выражения деформаций и напряжений связь между ними в пластической области различна для разных видов напряженного состояния и пределы текучести, прочности и сопротивление разрушению не являются константами материала». Задачу теории прочности Софья Исааковна формулировала в следующем виде: «...теория прочности должна устанавливать такие критерии, при помощи которых, зная поведение материала при простом напряженном состоянии (например, линейном растяжении), можно предсказать, когда наступит текучесть или разрушение материала (так называемые предельные состояния) при различных сложных напряженных состояниях».

В качестве универсальных для всех напряженных состояний предлагались следующие критерии

рии «для определения пределов текучести и сопротивления разрушению материалов:

- постоянство наибольшего нормального напряжения (1-я теория прочности);
- постоянство наибольшей положительной упругой деформации (2-я теория прочности);
- постоянство максимального касательного напряжения (3-я теория прочности);
- постоянство потенциальной энергии изменения формы (4-я теория прочности);
- постоянство полной работы деформации (теория Бельтрами)».

Целью всех предлагаемых теорий являлось сведение свойств материала в сложных условиях нагружения к свойствам при простейшем напряженном состоянии – одноосном растяжении. Софья Исааковна отмечает: «такое сведение сложно к простому, при котором совершенно игнорируется тот факт, что сам по себе сложный характер напряженного состояния может существенным образом изменить физическую и механическую природу материала, бесспорно ошибочно». В качестве критерия правомерности подходов теорий прочности к явлениям пластической деформации и разрушения Софья Исааковна предлагает обратиться к опыту как к критерию истинности.

Переходя к разбору теорий предельных состояний, С.И. Кишкина отмечает, что теория наибольших нормальных напряжений (1-я теория прочности), предполагающая наступление предельного состояния при достижении максимальным нормальным напряжением критического значения, независимо от величины других нормальных значений, не пригодна «для определения условий, при которых начинается пластическая деформация или наступает разрушение материала».

Теория наибольших удлинений или «приведенных напряжений» (2-я теория прочности), определяющая наступление предельного состояния при достижении критической величины наибольшей положительной упругой деформации, «удовлетворительно объясняет случаи хрупкого разрушения материалов, но совершенно не пригодна для определения начала текучести».

Теория максимальных касательных напряжений (3-я теория прочности), устанавливающая наступление текучести или разрушения материала при достижении максимальными касательными напряжениями критической величины, определенной как полуразность максимального и минимального напряжений, «не учитывает влияния средних главных напряжений, а также нормального напряжения в плоскости сдвига». «Установленное во многих опытах расхождение в пределах текучести при растяжении и сдвиге показывает, что 3-я теория прочности не во всех случаях правильно описывает условие наступления пластической деформации». «Что касается разрушения, то опыт показывает, что при разных

напряженных состояниях оно происходит, вообще говоря, при разной величине максимального истинного касательного напряжения». Опираясь на собственный экспериментальный материал, Софья Исааковна утверждает, что «...3-я теория прочности подтверждается лишь для наступления текучести чистых металлов, обладающих границентрированной или объемно-центрированной кубической решеткой, – меди, алюминия, железа, – а также некоторых отожженных сталей. Для такого металла, как магний (гексагональная решетка), пределы текучести, выраженные в максимальных касательных напряжениях, значительно изменяются при переходе от одного напряженного состояния к другому».

Теория постоянной энергии формоизменения устанавливает предельное состояние материала при накоплении последним некоторой величины потенциальной энергии изменения формы. Данное условие, известное как условие пластичности Мизеса–Генки, определяет потенциальную энергию упругой деформации, запасенную в материале. Связывая предельное состояние с разностями главных напряжений, 4-я теория прочности учитывает влияние среднего главного напряжения, но не учитывает влияние нормального напряжения в плоскости сдвига. Необходимость учета влияния нормального напряжения в плоскости сдвига обусловлена тем, что разница главных напряжений приводит к касательным октаэдрическим напряжениям. Теория постоянной энергии формоизменения оперирует с касательными октаэдрическими напряжениями, в то время как 3-я теория прочности опирается на максимальные касательные напряжения.

Рассматривая гипотезу П. Людвиг о независимости «обобщенной кривой», описывающей связь между максимальными касательными напряжениями и максимальными условными сдвигами от вида напряженного состояния, а также подход А. Надаи о существовании единой для всех напряженных состояний «кривой течения», в основу которой положены октаэдрические касательные напряжения и октаэдрические сдвиги, Софья Исааковна подвергает их критике. Критике подвергается и единая теория прочности Я.Б. Фридмана, поскольку данный подход он распространил и на явление разрушения, введя понятие об обобщенном сопротивлении срезам, не зависящем от напряженного состояния.

Отдавая должное подходу Я.Б. Фридмана, базирующемуся на двух критериях наступления разрушения: от нормальных напряжений – для случаев хрупкого разрушения и от максимальных касательных напряжений – для пластического разрушения, Софья Исааковна замечает, что единая теория прочности представляется «наиболее удачной... качественной схемой из всех предлагавшихся ранее». В единой теории прочности принималось, что материал обладает двумя само-

стоятельными константами прочности при разрушении: сопротивлением отрыву и сопротивлением срезу. Хрупкое разрушение материала от нормальных напряжений или пластичное разрушение от касательных напряжений определяется характером напряженного состояния (рис. 1).

Одно из положений единой теории прочности, на которое исследователи не всегда обращают внимание, Софья Исааковна сформулировала следующим образом: «Связь между напряжениями и сдвигами в координатах «касательные напряжения–сдвиги» выражается единой кривой, не зависящей от вида напряженного состояния. Конечная точка этой кривой представляет собой сопротивление срезу, являющееся константой материала. В случае, когда разрушение происходит путем отрыва, кривая деформации обрывается раньше. ...Вторая предпосылка единой теории прочности (в сочетании с тем, что за сопротивлением срезу и сопротивлением отрыву признается значение констант), оказавшись она справедливой, привела бы, по существу, к решению основной задачи, формулируемой каждой теорией прочности: дать критерий для наступления текучести и разрушения при любом сложном напряженном состоянии, зная поведение материала, скажем, при одноосном растяжении или сжатии».

Софья Исааковна сводит проблему теорий прочности к вопросу существования универсальной связи между деформациями и напряжениями вне зависимости от характера напряженного состояния, т. е. «обобщенной кривой течения», и правомерности рассматривать сопротивление отрыву и обобщенное сопротивление срезу в качестве констант материала, не зависящих от вида деформации.

Поскольку для оценки прочности конструкции крайне важной характеристикой материала является предел текучести, то Софья Исааковна, детально рассматривая данное предельное состояние, предлагает использовать следующие методы проверки универсальной кривой течения:

- метод сопоставления кривых течения, определенных при разных простейших напряженных состояниях с учетом специфики способа нагружения;
- метод испытания непосредственно при сложном напряженном состоянии, создаваемом, например, внешним или внутренним давлением при растяжении или сжатии, а также действием совместных видов нагружения, например растяжения и кручения;
- метод, предполагающий сопоставление диаграмм деформации образцов, один из которых деформировался в зоне пластического течения при другом виде нагружения;
- метод испытания с концентратором напряжения, позволяющим создать в вершине концентратора объемное напряженное состояние.

Сопоставление пределов текучести при растяжении и кручении наиболее простое методическое решение поставленной задачи. Истинные касательные напряжения, определяющие предел текучести при растяжении, устанавливаются следующими соотношениями: $t_s=0,5\sigma_s$ согласно 3-й теории прочности (Сен-Венана) и $t_s=0,577\sigma_s$ согласно 4-й теории прочности (Губера–Мизеса). Софья Исааковна провела большую серию экспериментов по определению истинных касательных напряжений при кручении на материалах разного класса и сопоставила с величинами, полученными при растяжении.

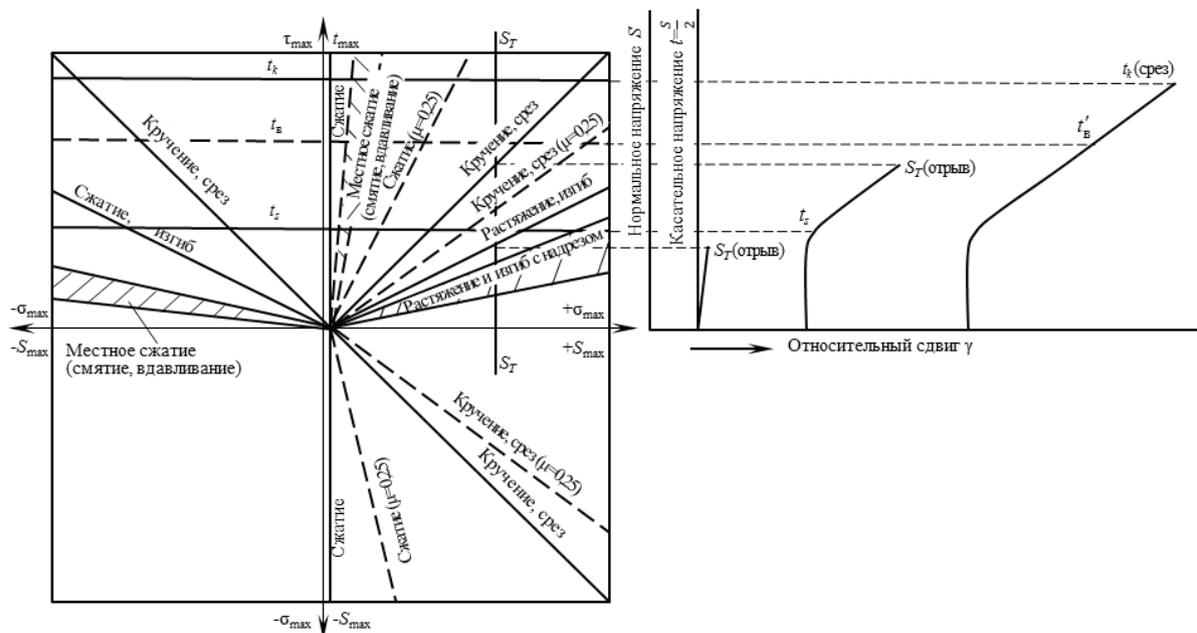


Рис. 1. Диаграмма механического состояния материала: хрупкого – при растяжении и пластичного – при сжатии [2]

Если условный предел текучести при кручении в рамках упругой модели определяется по формуле: $\tau_s = 16M_s / 3,14d^3$ (где τ_s – предел текучести при кручении; d – диаметр образца; M_s – крутящий момент), то истинный предел текучести, отражающий действительное распределение напряжений по сечению скручиваемого образца, определяется по формуле:

$$t_{\max} = \frac{1}{2\pi r^3} \left(3M + \theta \frac{dM}{d\theta} \right),$$

где t – истинное касательное напряжение; θ – угол закручивания на единицу длины образца; M – крутящий момент.

Диаграмма зависимости максимальных истинных касательных напряжений от максимального условного сдвига $t_{\max} - f(\gamma_{\max})$ для нормализованной стали 30ХГСА представлена на рис. 2.

Результаты испытаний материалов разного класса при различных режимах термообработки представлены Софьей Исааковной в ее монографии, наиболее характерные из них приведены в табл. 1.

Огромный массив экспериментальных данных, полученный С.И. Кишкиной практически для всех конструкционных материалов, дал ей основание для констатации следующих положений:

- условие пластичности Сен-Венана достаточно хорошо подтверждается только для чистых металлов с кубической решеткой (железа, меди, алюминия), для которых отношение $t_{0,3}/\sigma_{0,2}$ составляет 0,48–0,49;
- для алюминиевых сплавов отношение $t_{0,3}/\sigma_{0,2}$ находится в пределах 0,39–0,67;
- для сталей отношение $t_{0,3}/\sigma_{0,2}$ (в зависимости от термообработки) получено в диапазоне значений 0,49–0,71;
- для магния и магниевых сплавов пределы текучести оказались наиболее низкими и отношение

$t_{0,3}/\sigma_{0,2}$ находится в диапазоне значений 0,25–0,31.

Полученные результаты важны не только для обоснования тезиса о зависимости механических характеристик от вида напряженного состояния, но и для практических расчетов прочности. Так, прочност, опираясь на 3-ю теорию прочности и предел текучести сплава МА5, полученный при растяжении, принимает предел текучести при кручении равным 11,1 кгс/мм², «...тогда как расчетный предел текучести этого сплава составляет лишь 6,6 кгс/мм², т. е. приблизительно вдвое ниже теоретического».

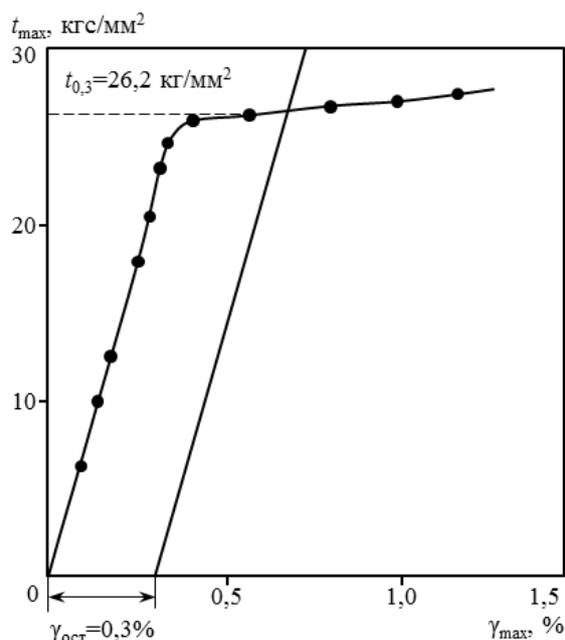


Рис. 2. Истинный предел текучести при кручении образца из нормализованной стали 30ХГСА, определенный графическим методом по кривой $t_{\max} = f(\gamma_{\max})$, где γ_{\max} – максимальный условный сдвиг

Таблица 1

Сопоставление истинного предела текучести при кручении с пределом текучести при растяжении*

Материал	Режим термообработки	Предел текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$	Предел текучести при кручении $t_{0,3}$	$t_{0,3}/\sigma_{0,2}$
		кгс/мм ²		
Железо армо	Отжиг при 800°C	25,2	12,1	0,48
Сталь 25	Отжиг при 900°C	32,2	15,7	0,49
	Закалка и отжиг при 200°C	122,0	74,9	0,61
Сталь 45	Отжиг при 860°C	35,2	18,8	0,53
	Закалка и отжиг при 600°C	74,2	44,7	0,59
Сталь 30ХГСА	Нормализация при 900°C	54,2	28,8	0,55
	Закалка и отжиг при 510°C	96,0	64,1	0,67
Алюминий	Отжиг при 360°C	4,1	2,1	0,49
Алюминиевый сплав Д16	Закалка и естественное старение	40,7	15,9	0,39
Алюминиевый сплав системы Al-Cu-Mg-Zn	Закалка и искусственное старение при 140°C	57,8	23,4	0,40
Магний	Отжиг при 450°C	12,7	3,3	0,27
Магниевый сплав МА5	Закалка с 420°C	22,3	5,6	0,25

* Здесь и далее размерности даны в единицах, приведенных в [1].

Исследование влияния напряженного состояния на характеристики разрушения сплавов (сопротивление разрушению, предел прочности, предельная пластичность) проводились Софьей Исааковной непосредственно при наложении гидростатического давления на образец (P). Испытания проводились на оригинальной установке, спроектированной в ВИАМ, по схеме, разработанной Н.Н. Давиденковым. Внешний вид установки и диаграммы испытаний магниевых сплавов МА2 при растяжении без ($P=1$ ат) и с наложением гидростатического давления ($P=2200$ ат) представлены на рис. 3.

Эксперименты, проведенные на алюминиевых и магниевых сплавах, меди, бериллиевой бронзе, показали, что «...гидростатическое давление, как правило, значительно повышает сопротивление пластической деформации (предел прочности), сопротивление разрушению и пластичность материалов». Однако однозначной связи между повышением сопротивления разрушению и пластичностью установлено не было и даже выявлена аномалия при испытании сплава МА2, на котором при повышении предела прочности на 41,5% и сопротивления разрушению – на 23,2% пластичность, определяемая сужением, снизилась на 15%.

Исследования Софьи Исааковны подтвердили эксперименты Бриджмена по влиянию всестороннего давления на сопротивление разрушению и пластичность металлов и показали влияние величины нормальных напряжений в плоскости сдвига на пластическое течение, т. е. необходимость учета шарового тензора, а не только девиатора напряжений при изучении процессов пластической деформации.

Третий подход к исследованию критикуемого принципа независимости кривой течения от вида напряженного состояния Софья Исааковна формулирует следующим образом – «...одной и той же по величине эквивалентной деформации при разных напряженных состояниях соответствует одинаковое эквивалентное сопротивление пластической деформации». Так, если справедливо утверждение о независимости кривой течения от напряженного состояния, то поведение материала будет иллюстрировать рис. 4, а; если же диаграммы деформирования отражают процесс как на рис. 4, б, то это указывает на отсутствие единой кривой течения.

Проводилось изучение сопротивления пластической деформации при разных степенях деформации для вариантов: волочение с последующим растяжением и прокатка с последующим растяжением. В результате испытаний показано, что только для чистых металлов (медь и алюминий) сопротивление пластической деформации и сопротивление разрушению не зависят от способа деформирования, «...т. е. поведение этих чистых металлов описывается обобщенной кривой сопротивления». Для остальных материалов – исследовали сталь 25, сталь 50, сталь 30ХГСА, бериллиевую бронзу – получено, что при одинаковой величине эквивалентной деформации разным схемам деформирования соответствуют разные сопротивления пластической деформации. Для исследованных материалов диаграммы деформирования фиксируют увеличение отклонения от исходной кривой деформации с увеличением степени предварительного наклепа. Для учета влияния объемно-напряженного состояния материала в

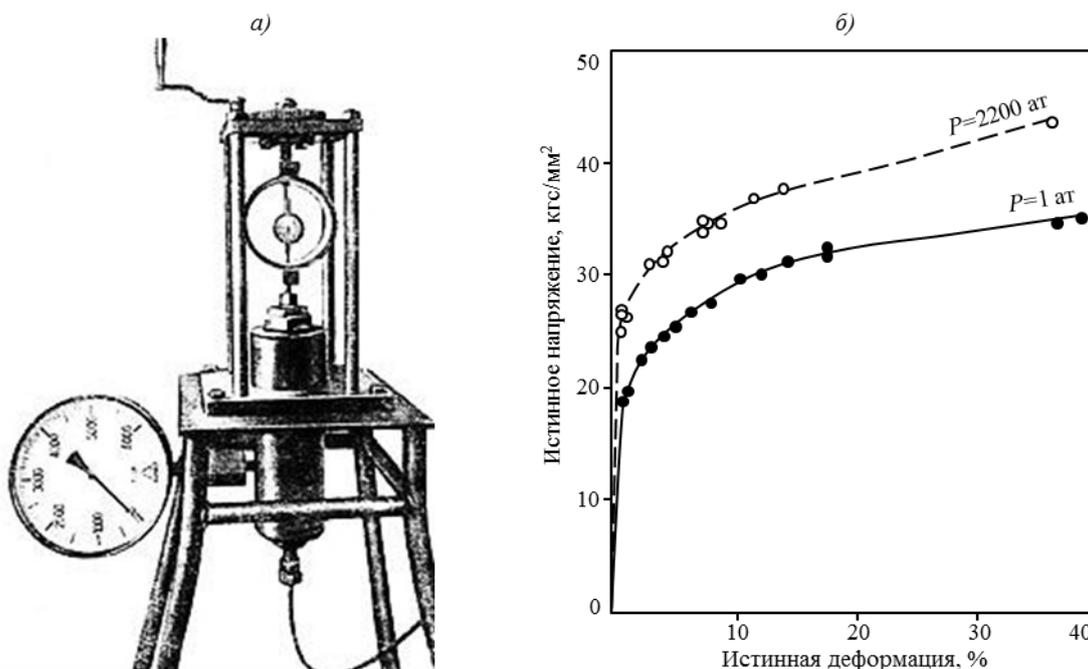


Рис. 3. Внешний вид установки для испытаний на растяжение под гидростатическим давлением (а) и влияние гидростатического давления на диаграмму деформации при растяжении магниевых сплавов МА2 (б)

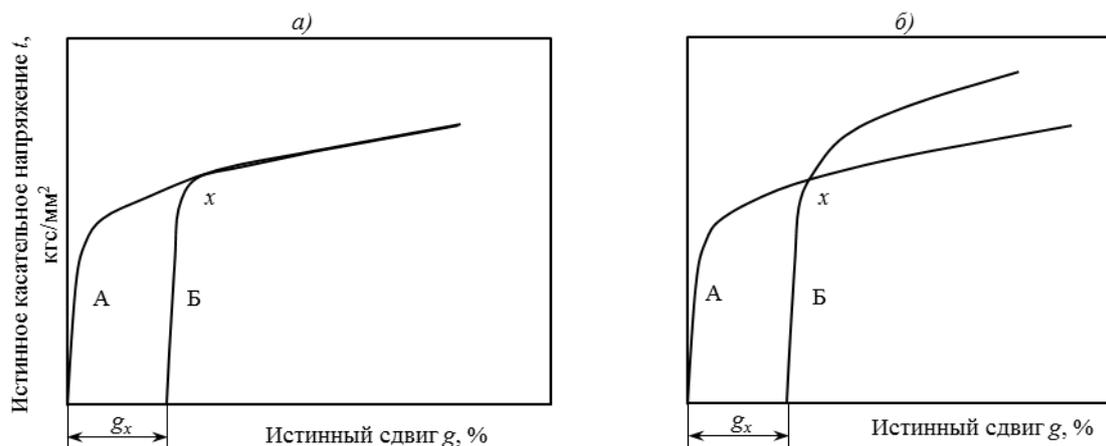


Рис. 4. Схема возможного изменения диаграммы деформации при переходе от одного напряженного состояния к другому (А, Б – разные схемы деформации материала; g_x – предварительная деформация)

шейке образца использовалась формула Н.Н. Давиденкова:

$$S_k = S_{k \text{ эфф}} (1 + a/4R),$$

где S_k – номинальное сопротивление разрушению, определяемое непосредственно при испытании на растяжение; $S_{k \text{ эфф}}$ – действительное сопротивление разрушению; a – радиус наиболее узкого поперечного сечения шейки; R – радиус кривизны на контуре шейки.

Поскольку истинные деформации обладают свойством аддитивности, то полная деформация

$$e = e_0 + e_p,$$

где $e_0 = \ln F_0 / F_n$ – истинная деформация при волочении, где F_0 – исходная площадь поперечного сечения; F_n – площадь поперечного сечения при данной степени обжатия; e_p – истинная деформация при растяжении.

Полученные Софьей Исааковной истинные диаграммы деформации для стали с поправкой на объемно-напряженное состояние в шейке показали рост сопротивления разрушению стали 50 – на 36,4 кгс/мм², стали 25 – на 29,7 кгс/мм², стали 30ХГСА – на 32,5 кгс/мм², бериллиевой бронзы – на 46,5 кгс/мм².

Аналогичные исследования были проведены и по варианту – прокатка+растяжение (рис. 5). Испытания стали 30ХГСА подтвердили основное положение, декларируемое Софьей Исааковной, об отсутствии единой кривой течения, что следует из диаграмм деформации, полученных при растяжении образцов после прокатки с разной степенью обжатия. Диаграммы (рис. 6) приведены в координатах «максимальное касательное напряжение (t_{max}) – полный максимальный сдвиг (g_{max_n})», где g_{max_n} представляет собой сумму максимального сдвига при прокатке (g_{max_0}) и максимального сдвига при растяжении (g_{max_p}).

Получив экспериментальное подтверждение основного тезиса о влиянии напряженного состояния на сопротивление пластической деформации и разрушению, Софья Исааковна обращается к методике испытания материала с концентратором

напряжений, который обеспечивает реализацию объемного напряженного состояния в надрезе. Теория упругости позволяет рассчитать распределение напряжений только в упругой области, «что же касается пластической области, то до сих пор нет сколько-нибудь надежного метода (ни аналитического, ни экспериментального), который позволил бы учесть перераспределение напряжений, вызываемое пластической деформацией, и дал бы возможность установить истинную картину распределения напряжений, хотя бы в момент разрушения». Объяснение экспериментов с надрезом на хрупких материалах, разрушающихся без пластической деформации в надрезе при средних напряжениях ниже прочности гладкого образца, равно как и пластичных материалов, в которых объемность приводит к «кажущемуся» повышению сопротивления пластической деформации и сопротивления разрушению, базируется на признании за пределом текучести и сопротивлением разрушению значения констант. Однако, по мнению Софьи Исааковны, «тезис о постоянстве предела текучести и сопротивления разрушению при разных напряженных состояниях оказывается ошибочным, и нет никаких оснований полагать, что переход от одноосного растяжения к всестороннему только потому, что это последнее создается надрезом, не приведет к изменению свойств». Софья Исааковна считала «недостаточно обоснованной» и точку зрения Н.Н. Давиденкова, полагавшего, что радиальные растягивающие напряжения во всех случаях снижают сопротивление разрушению, «разупрочняя» материал. В противовес данному мнению Софья Исааковна приводит результаты испытаний образцов из бериллиевой бронзы, подвергнутых предварительной нагартовке. Объемное напряжение в надрезе обусловило прирост сопротивления разрушению на 54–67% при существенном повышении предельной пластичности на 17–27%, что указывает на фактическое повышение сопротивления разрушению. Неожиданный факт повыше-

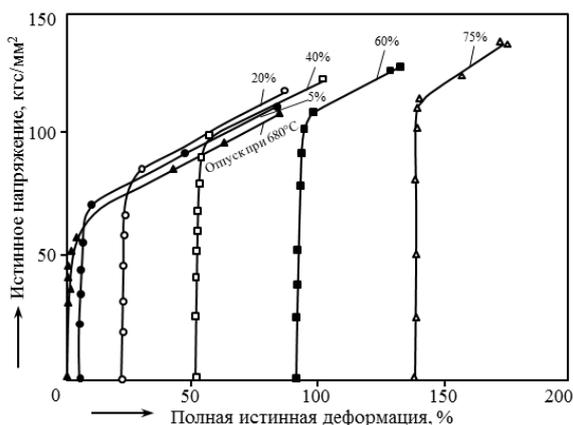


Рис. 5. Истинные диаграммы растяжения высокоотпущенной (\blacktriangle – отпуск при 680°C) и холоднотянутой стали 50 с учетом предварительной деформации при волочении на 5 (\bullet), 20 (\circ), 40 (\square), 60 (\blacksquare) и 75% (Δ)

ния пластичности надрезанного образца (по сравнению с гладким образцом) Софья Исаковна связывает со «специфическими особенностями поведения закаленной бериллиевой бронзы», указывая, что изменение механических свойств под влиянием холодной деформации часто не укладывается в рамки обычных представлений, поскольку материалы в этих условиях могут обладать неустойчивой структурой, претерпевающей превращения под влиянием пластической деформации.

Анализируя природу влияния напряженного состояния на механические характеристики, Софья Исаковна выделяет три основных фактора, которые связывают напряженное состояние со структурой материала: поворот плоскостей скольжения, величина и знак среднего главного напряжения и величина нормального напряжения в плоскости сдвига. Наиболее наглядно влияние напряженного состояния на деформационную способность материала иллюстрируется примером действия среднего главного напряжения (рис. 7). В случае, когда среднее главное напряжение равно одному из главных, появляются дополнительные возможности для сдвигов, что обуславливает изменение прочностных характеристик материала.

К аналогичным выводам Софья Исаковна приходит, рассматривая напряженное состояние при сжатии и растяжении, отличающееся только знаком нормального давления в плоскости сдвига: при растяжении в плоскости сдвига действует растягивающее напряжение, при сжатии – сжимающее (рис. 8).

Поскольку сжимающие напряжения затрудняют скольжение одной плоскости по другой, то можно ожидать повышения сопротивления пластической деформации, что согласуется с некоторыми опытными данными (рис. 9).

Завершая анализ влияния напряженного состояния на прочностные свойства металлов, Софья Исаковна утверждает, что «только для меди, же-

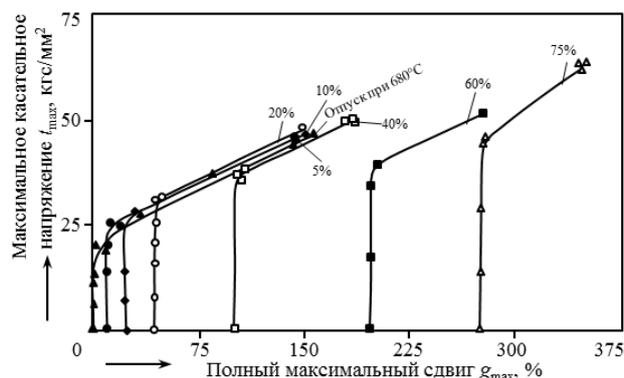


Рис. 6. Истинные диаграммы деформации при растяжении высокоотпущенной (\blacktriangle – отпуск при 680°C) и холоднотянутой стали 30ХГСА на 5 (\bullet), 10 (\blacklozenge), 20 (\circ), 40 (\square), 60 (\blacksquare) и 75% (Δ)

леза, алюминия и мягких отожженных сталей при определении предела текучести можно пользоваться условием пластичности Сен-Венана... и, в общем случае, основной закон теории пластичности, согласно которому связь между напряжениями (касательными) и деформациями (сдвигами) не зависит от вида напряженного состояния, является ошибочным».

Изучение зависимости сопротивления разрушению от вида напряженного состояния и способа деформации привело Софью Исаковну к очевидному заключению «о возможности повысить сопротивление разрушению материалов путем предварительной деформации (наклепа) в условиях более благоприятного напряженного состояния, подобно тому, как повышают свойства материала предварительной термической обработкой» (рис. 10). Исследование прочностных характеристик различных металлов, начиная с чистых – меди и кадмия и кончая высоколегированной хромоникелевой сталью ЭЯ2, после предварительной деформации, реализуемой различными способами – растяжением, волочением, кручением и сжатием, дало основание С.И. Кишкиной сделать следующий вывод: «сопротивление срезу чистых металлов нельзя повысить предварительным наклепом, тогда как сопротивление срезу сталей и цветных сплавов весьма сильно повышается после предварительной деформации, причем существенное значение в этом случае имеет способ наклепа».

Влияние наклепа не только повышает сопротивление разрушению при статических нагрузках, но и благотворно влияет на усталостные характеристики металлов. Повышение предела выносливости, исходя из общепринятых соображений, объяснялось наличием остаточных напряжений сжатия, возникающих в наружных слоях (рис. 11).

Однако некоторые экспериментальные факты не могут быть объяснены, базируясь только на данном подходе. К этим фактам Софья Исаковна

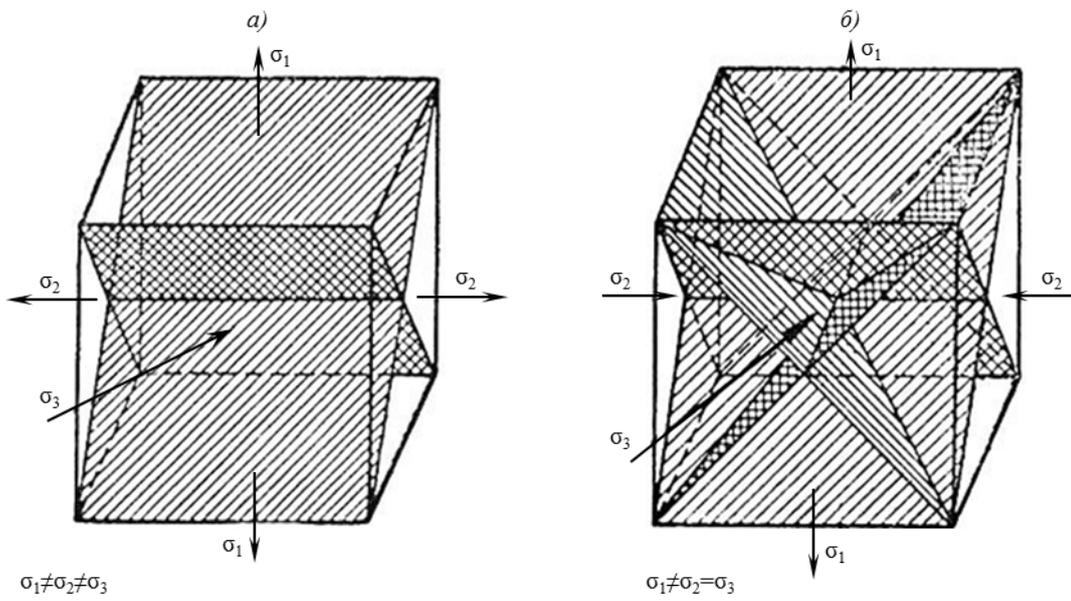


Рис. 7. Плоскости максимальных касательных напряжений при равной величине среднего главного напряжения

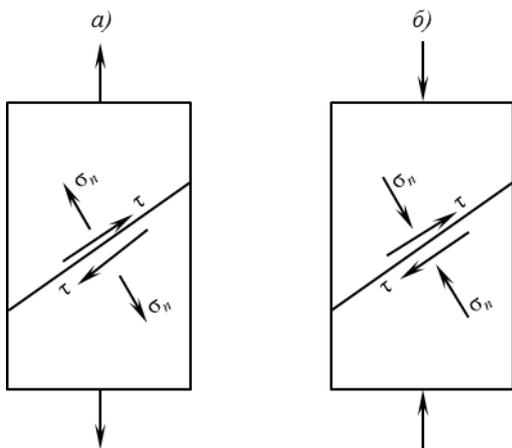


Рис. 8. Нормальные напряжения в плоскости сдвига при растяжении (а) и сжатии (б)

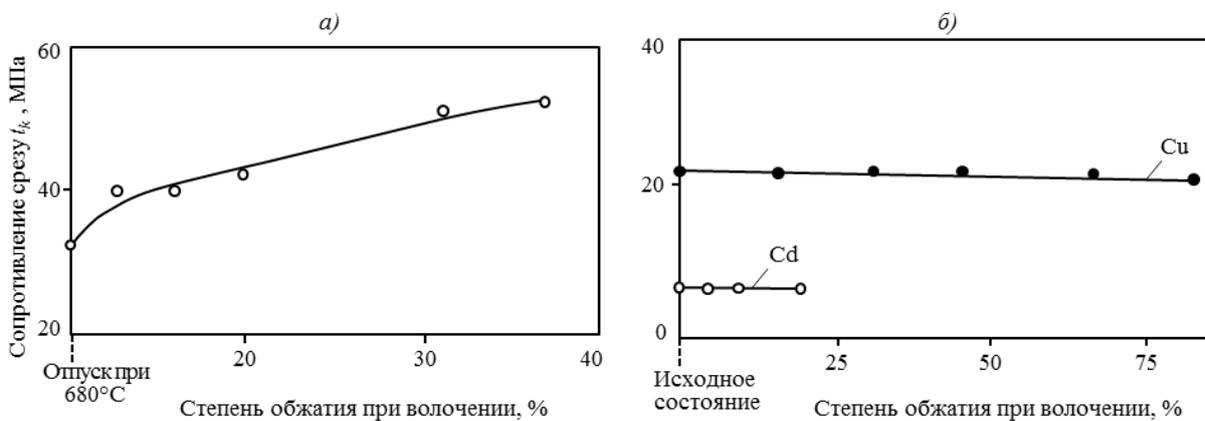


Рис. 9. Влияние степени обжатия при волочении на сопротивление срезу стали 30ХГСА (а), меди и кадмия (б)



Рис. 10. Распределение осевых напряжений до и после поверхностного наклепа

относит: отсутствие повышения предела выносливости армо-железа при поверхностном наклепе; повышение предела выносливости наклепом прокаткой и волочением, хотя при этом в поверхностных слоях создаются остаточные растягивающие напряжения. При этом наклеп при растяжении с остаточными напряжениями положительного знака в наружных слоях привел к более значительному повышению предела выносливости, чем поверхностный наклеп обкаткой.

Исходя из этого Софья Исааковна полагала, что «основным фактором, ответственным за повышение предела выносливости после поверхностного наклепа, является происходящее при наклепе повышение сопротивления разрушению поверхностного слоя». При этом она не исключала возможности повышения предела выносливости за счет наведения остаточных сжимающих напряжений.

Считая, что сопротивление разрушению не является константой материала, Софья Исааковна рассматривала пути его повышения, одним из которых является создание метастабильных структур, претерпевающих структурные превращения при деформации, реализуемой при наклепе. Это положение было доказано испытанием стальных образцов с разным содержанием углерода и кремния (рис. 12).

Результаты показали, что чем выше содержание кремния, тем меньше повышается предел выносливости после дробеструйной обработки, поскольку при высоком содержании кремния сталь обладает устойчивой структурой, не претерпевающей превращений в процессе наклепа. Из-за незначительного увеличения сопротивления разрушению поверхностного слоя предел выносливо-

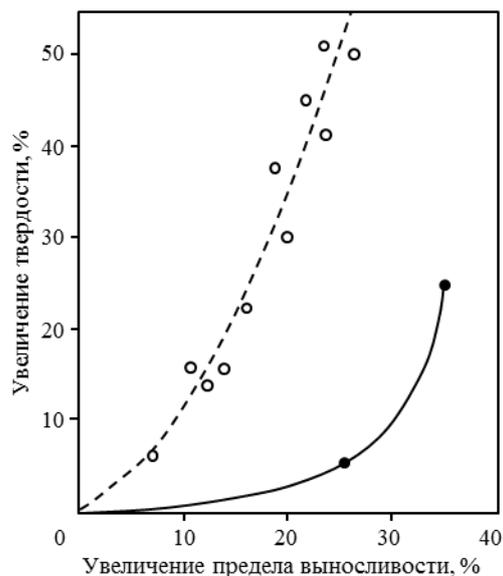


Рис. 11. Влияние наклепа при растяжении (●) и поверхностного наклепа обкаткой (○) на предел усталости (данные О. Хоржера)

сти образцов с повышенным содержанием кремния не повысился. При увеличении содержания углерода структурные превращения в процессе деформации происходят более интенсивно, что приводит к повышению сопротивления разрушению и связанному с ним пределу выносливости.

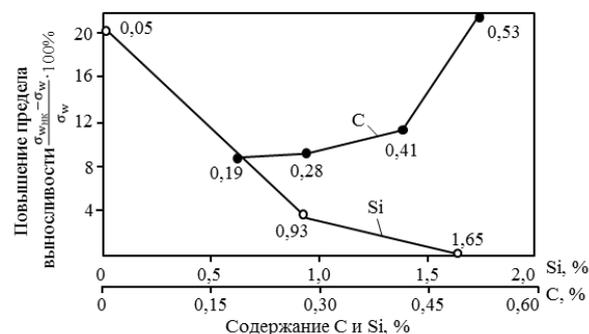


Рис. 12. Влияние углерода и кремния на эффект повышения предела выносливости при поверхностном наклепе для стали типа хромансиль

Подтверждение тезиса о доминирующем влиянии характеристики сопротивления разрушению как фактора повышения предела выносливости Софья Исааковна видела в эксперименте по оценке усталости цементуемых и азотируемых образцов после дробеструйной обработки, который показал существенный рост предела выносливости на цементуемых образцах и незначительный – на азотируемых. «Надо думать, что повышение предела выносливости, достигаемое при цементации или азотизации, связано не с остаточными напряжениями сжатия в цементованном или азотированном слое, а с более высоким сопротивлением разрушению этого слоя».

Таблица 2

**Повышение предела выносливости после поверхностного наклепа
в зависимости от состояния поверхности**

Сталь	Режим термообработки	Состояние поверхности	Предел выносливости, кгс/мм ²		Эффект повышения предела выносливости $\sigma_{-1} = \frac{\sigma_{w_{HK}} - \sigma_w}{\sigma_w} \cdot 100\%$
			до наклепа σ_w	после наклепа $\sigma_{w_{HK}}$	
30ХГСА	Закалка с 890°C+ +отпуск при 200°C	Полировка	61	80	31,2
		Обточка резцом	53	82	
	Закалка с 890°C+ +отпуск при 600°C	Полировка	50,5	53,5	6
		Обточка резцом	37,5	52,5	40
18ХНВА	Закалка с 890°C+ +отпуск при 170°C	Полировка	61	68,5	12,3
		Обточка резцом	46,5	63,5	31,5

Крайне интересный результат, имеющий далеко идущие последствия в плане совершенствования технологии обработки поверхности, Софья Исааковна получила при испытании образцов на усталость после различных режимов механической обработки в сочетании с поверхностным наклепом (табл. 2).

Поверхностный наклеп оказал благоприятное влияние на качество поверхности, залечив все субмикроскопические надрывы, являющиеся концентраторами напряжений. Результаты, полученные Софьей Исааковной, убедительно показывают целесообразность отказа от дорогостоящей операции полировки и необходимости применения поверхностного наклепа.

Результаты, представленные в первой монографии С.И. Кишкиной «Прочность и пластичность металлов», заложили основу для дальнейших изысканий в области прочности конструкционных материалов. Главной особенностью этой монографии является стремление связать прочностные характеристики материала с его структурой и найти пути для их повышения. Интеллектуальный фундамент, заложенный в первой монографии Софьи Исааковны, явился основой дальнейшего исследования процессов усталостного разрушения и представления разрушения как кинетического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ратнер С.И. Прочность и пластичность металлов. М.: Оборонгиз. 1949. 152 с.
2. Фридман Я.Б. Единая теория прочности НКАП. М.: ВИАМ. 1943. 96 с.