

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ КАК СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕТАЛЛОВ

С. В. Сериков

ООО «СУРА ЛТД» (г. Днепр, Украина)

Дан краткий обзор развития теорий механики твердого деформируемого тела при разработке методов определения механических свойств металлов, ударной вязкости, трещиностойкости. Сформулирован принципиально новый способ идентификации металлов относительно эксплуатационной надежности. Здесь за основу описания деформации металлов под действием нагрузок с ненулевой скоростью деформаций вплоть до разрушения принята известная математическая модель вязкопластической среды. На конкретных опытных данных показана работоспособность нового метода. Экономичен, достоверен и прост в применении.

Ключевые слова: идентификация металлов, удельная работа разрушения, коэффициент динамической вязкости, скорость деформации, относительное удлинение, геномообразующая матрица.

При всем многообразии металлов, сплавов и изделий из них со стороны конструкторов и технологов непременно возникает вопрос об их эксплуатационной надежности в условиях внешних нагрузок. В связи с этим достаточно давно разработаны методы определения механических свойств металлов и узаконены нормативно-технические стандарты (ГОСТ 1497–84, ГОСТ 10006–80). Разработаны также методы и оборудование для оценки макро- и микроструктуры материалов вплоть до атомного уровня. Со временем оказалось, что этого недостаточно, чтобы прогнозировать разрушительные процессы в металлах, например: катастрофические разрушения стальных трубопроводов, мостов, надводных и подводных судов.

Большая заслуга в создании теоретических основ хрупкого разрушения с позиций сплошной среды принадлежит А. Гриффитсу [1, 2]. Дальнейшее обобщение его идеи о квазистатическом разрушении упруго-хрупкого материала получили в работах Г. Ирвина [3], Е. Орована [4] и отечественных ученых Г. Черепанова [5], Н. Махутова [6, 7], Д. Ивлева [8], В. Кузнецова [9] и многих других, благодаря которым в разделе механики твердого деформируемого тела появилось отдельное направление – механика разрушения. Это привело к разработке отечественных стандартов на испытание металлов на ударную вязкость (ГОСТ 9454–78), а также метода определения характеристик трещиностойкости (ГОСТ 25.506–85), соответственно международных стандартов (ISO 12135, ASTM 1290, ASTM 1737). Одновременно развивались математические модели механики сплошной среды, призванные количественно оценить напряженно-деформированное состояние материала под нагрузкой: теория упругости [10], пластичности [11], ползучести [12], вязкопластичности [13, 14], медленных упругопластических деформаций [15] и др.

Все эти теории, использующие феноменологические законы, не умаляя заслуг их авторов, решают достаточно ограниченный класс технологических проблем в обработке металлов давлением. А здесь необходимо знать закономерность изменения формоиз-

менения материала во времени процесса нагружения вплоть до разрушения. Поэтому с целью получения критерия сравнения применяемых в технике материалов на основе перечисленных теорий разработаны расчетно-экспериментальные методы определения предела выносливости, критического коэффициента интенсивности напряжений, скорости роста усталостной трещины, сопротивления многоциклового усталости и др. (см., например, [16]). Расчетный фундамент перечисленных методик основан исключительно на теории упруго-хрупких сред.

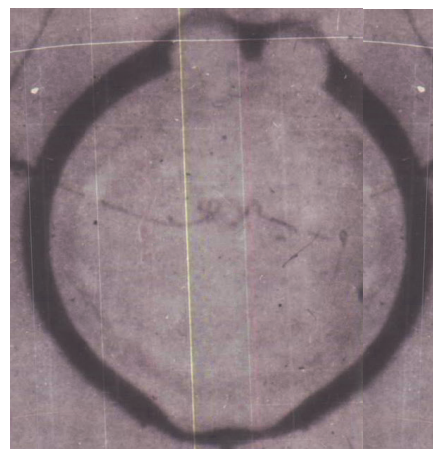
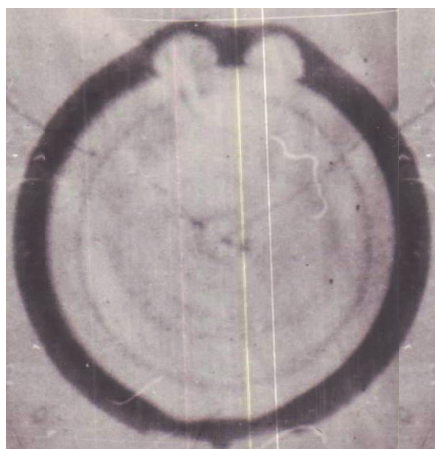
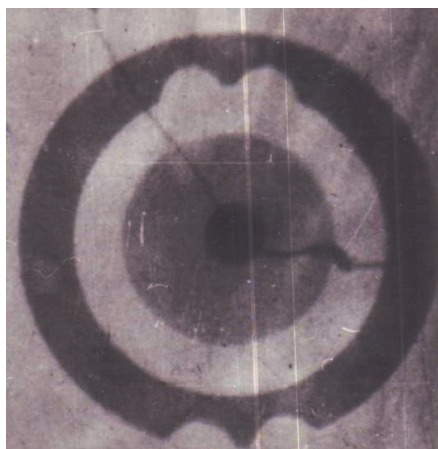
Автор статьи более пятидесяти лет принимал непосредственное участие в разработке новых технологий, технических условий и технологических инструкций по промышленному производству бесшовных горячекатаных и холоднодеформируемых труб из сталей разных марок: 10X10H20T2 – трубы 200×30×11520 мм, 219×45×11500 мм для изготовления перископов [17]; мартенситно-стареющая сталь ЭП836 (03H17B10K10MT) – трубы 42×11 мм для оборонной промышленности; дисперсионно-твердеющая сталь ЭИ702 (36НХТЮ) – трубы 6×0,8 мм, 8×1,2 мм, 10×0,3 мм для приборостроения. В этом перечне есть также трубы из титанового сплава ПТЗВ – 260×45×5200 мм, 245×30×260 мм для изготовления паропроводов [18]; трубы из технически чистых металлов: тантал (ТВЧ), ниобий (НБ1), молибден (МЧВП), титан (ВТ1-0), никель (НП2Э) капиллярных размеров для электроники и медицины [19].

На основе практического опыта обработки металлов давлением можно с уверенностью утверждать:

процесс формоизменения металла в очаге деформаций есть функция (матрица), зависящая от координат, времени, температуры и физико-механических свойств деформируемого материала;

предельная относительная деформация для широкого класса металлов и их сплавов варьируется: при горячем переделе 50–200 %, при холодном 15–50 %;

скорость деформации металлов в станах продольной прокатки в пределах $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$; при волочении $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$.



Рентгенограмма расширения алюминиевого кольца под действием продуктов взрыва заряда ТГ (50/50) в моменты времени: 0, 25, 35 мкс

Таблица 1. Механические свойства и пористость отливок сплава ВТ20Л после различных режимов [10]

№	Режим обработки	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	A_k (КСУ), МДж/м ²	σ_{-1} , МПа	Пористость, %	μ , ГПа·с	A_* , ГДж/м ²
1	I	860	820	8,0	0,60	290	2,8	8,0	367
2	II	890	850	9,0	0,70	—	2,8	8,0	444
3	III	990	930	7,5	0,61	320	1,7	12,0	443
4	IV	1080	990	8,9	0,50	520	1,0	18,0	645

Отметим, что существуют сплавы, которые при определенной скорости деформаций и температуре деформируются в режиме сверхпластичности без разрушения до 1000 % предельной относительной деформации [20, 21]. Одно время у автора была возможность провести широкую серию опытов по взрывному нагружению кольцевых оболочек из различных металлов: алюминий, медь, латунь, сталь [22]. Необходимо было ответить на вопрос: почему количество образующихся после взрыва осколков у более прочного материала при одинаковой плотности, но с разной пластичностью существенно больше, чем у менее прочного? Здесь скорость деформации составляла $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Разрушение колец происходило после достижения предельной деформации 25-65 %. На рис. 1 показана рентгенограмма расширения алюминиевого кольца с выточками (по две на внутренней и внешней поверхности) в моменты времени: 0, 25, 35 мкс после инициирования цилиндрического заряда ВВ (ТГ50/50) внутри кольца. Прежде чем кольцо разрушилось по внутренним выточкам, материал кольца сдеформировался более чем на 40 %. Внешние при этом практически «затекли».

Таким образом, при обработке давлением напряженно-деформационные характеристики металлов и сплавов ближе к модели вязкопластической среды [13, 14], где нет ограничений на величину предельной деформации при ненулевой скорости деформаций.

Математическая модель вязкопластического материала основана на двух гипотезах [13], которые со временем получили экспериментальное подтверждение:

направления максимальных скоростей скольжения совпадают с направлениями максимальных напряжений в каждой точке непрерывной среды;

максимальное касательное напряжение при деформации среды всегда больше некоторой постоянной и является линейной функцией максимальной скорости скольжения.

Обозначим $\vec{x}$ — систему координат, $t \geq 0$ — время,

$\Pi(\vec{x}, t)$, $H(\vec{x}, t)$ соответственно инварианты интенсивности касательных напряжений и скоростей деформаций сдвига. Тогда согласно сформулированным гипотезам для вязкопластической непрерывной среды имеем линейную зависимость при фиксированной температуре

$$\Pi(\vec{x}, t) = \sigma_{02} + \mu H(\vec{x}, t), \quad (1)$$

где σ_{02} — пластическая постоянная, характеризующая прочностную характеристику материала, в дальнейших расчетах приравниваем ее к величине предела текучести с размерностью [МПа]; μ — коэффициент динамической вязкости среды, характеризует внутреннее трение и историю нагружения материала во времени, с размерностью [МПа · с]. Отметим, что в случае $\mu = 0$, $\sigma_{02} > 0$ имеем классическую модель идеальной пластичности [11]. При $\mu > 0$, $\sigma_{02} = 0$ — модель вязкой жидкости [23]. В случае $\mu = 0$, $\sigma_{02} = 0$ — модель идеальной жидкости [24]. Например, благодаря этой модели получены основные закономерности пробивания преграды кумулятивной струей [25].

Таким образом, определившись с выбором среды, получим общую математическую модель нестационарной деформации материала вплоть до разрушения

Таблица 2. Зависимость механических свойств сталей 29НХ, 47НД от направления прокатки [43]

№	Направление вырезки образца относительно оси прокатки	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	μ , ГПа·с	A^* , ГДж/м ²
Сплав 29НХ						
1	Под углом 45°	461/402	323/274	37/36	27,6/25,6	398/293
2	Вдоль проката	333/372	304/343	14/7,5	5,8/5,8	78/53
3	Поперек проката	333/343	265/323	15/10	13,6/4,0	84/59
Сплав 47НД						
1	Под углом 45°	431/323	196/147	37/38	47,0/35,2	344/199
2	Вдоль проката	353/382	147/157	18/21	41,2/45,0	114/154
3	Поперек проката	363/392	147/127	21/23	43,2/53,0	140/178

Примечание: в числителе приведены механические свойства сплавов после отжига при 800 °С; в знаменателе – при 1000 °С.

Таблица 3. Механические свойства сплава 36НХ [43]

№	T , °С	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	A_k (КСУ), МДж/м ²	μ , ГПа·с	A^* , ГДж/м ²
1	27	421	255	50	2,8	33,2	443
2	–196	834	559	43	2,3	55,0	1493
3	–253	950	677	50	1,8	54,6	2280

[26, 27]: классическая система дифференциальных уравнений неустановившегося движения непрерывной среды вне поля внешних массовых сил, условие непрерывности, уравнение состояния, критерий разрушения, граничные и начальные условия. Построение математической модели для описания конкретного физического процесса, как правило, возможно разными способами. Главные критерии здесь – выполнение законов термодинамики, из которых следует, что скорость диссипации механической энергии в единице объема должна быть всегда положительной [28].

При всей фундаментальности постановки задачи есть возможность определить класс точных аналитических решений сформулированной математической модели для простейших областей: прямолинейная полоса [29, 30], круглый прут [31, 32], труба [33, 34], сфера [35, 36]. Во всех случаях получен важный для практики вывод: предельная деформация вязкопластического материала имеет пик пластичности в зависимости от скорости деформации. По-видимому, впервые на это обратил внимание А. Г. Иванов в опытах при разрушении стальных труб продуктами взрыва [37]. Известны эксперименты для сталей 40Х, Х18Н9Т и алюминиевого сплава Д16, когда экстремум обнаружен в диапазоне сравнительно малых скоростей деформаций [32].

Рассмотрим более детально процесс определения механических свойств металлов при растяжении гладких плоских или круглых образцов вплоть до разрушения согласно ГОСТ 1497–84, ГОСТ 10006–80. Здесь осуществляется неустановившаяся деформация материала при постоянной скорости деформаций ($\dot{\epsilon} = \text{const}$) с фиксированной температурой T . Также примем, что плотность материала при одноосном растяжении остается постоянной ($\rho = \text{const}$). Боковые поверхности (границы) образцов остаются свободными

от нагрузок. В этом простейшем случае из решения математической модели в схеме вязкопластической среды для прямолинейной полосы [31] и круглого прутка [32] получим определяющие соотношения: в случае растяжения плоского образца

$$\mu = \frac{(\sigma_b - \sigma_{02})}{2\dot{\epsilon}}, A^* = \frac{c\delta_5\sigma_{02}^2}{2E\dot{\epsilon}}[1 + 2\mu\dot{\epsilon}/\sigma_{02}]^2, \quad (2)$$

в случае растяжения круглого образца

$$\mu = \frac{(\sigma_b - \sigma_{02})}{3\dot{\epsilon}}, A^* = \frac{c\delta_5\sigma_{02}^2}{2E\dot{\epsilon}}[1 + 3\mu\dot{\epsilon}/\sigma_{02}]^2, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга; c – скорость звука продольных волн; σ_b , σ_{02} , δ_5 – пределы прочности и текучести, предельная относительная деформация, которые определяются из испытаний; μ , A^* – соответственно коэффициент динамической вязкости и удельная работа разрушения, которые количественно определяются по формулам (2) и (3).

При этом максимальное относительное удлинение $\delta_{5\text{max}}$ для материала (пик пластичности) оценивается соотношениями [38]:

в случае растяжения плоского образца

$$\delta_{5\text{max}} = \frac{4A^*E}{3c\mu\sigma_{02}} \text{ при } \dot{\epsilon} = \frac{\sigma_{02}}{2\mu}, \quad (4)$$

в случае растяжения круглого образца

$$\delta_{5\text{max}} = \frac{3A^*E}{3c\mu\sigma_{02}} \text{ при } \dot{\epsilon} = \frac{\sigma_{02}}{3\mu}. \quad (5)$$

По определению A^* с размерностью [Дж/м²] – удельная работа на образование новой поверхности трещины, является характеристикой среды. С увеличением параметра A^* повышается эксплуатационная надежность рассматриваемого материала. Величина μ

Таблица 4. Механические свойства сплава Х27Ю5Т [43]

№	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\sigma_{02}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\mu, \text{ГПа}\cdot\text{с}$	$A^*, \text{ГДж/м}^2$
1	20	680	534	15,9	29,2	371
2	200	660	425	24,3	47,0	534
3	400	605	357	25,5	49,6	471
4	600	375	354	32,9	4,2	233

существенно зависит от макро- и микроструктуры материала.

В качестве примера рассмотрим процесс изготовления бесшовных труб из сплава ПТЗВ на ОАО «ЧТПЗ» (г. Челябинск). Трубы $245 \times 30 \times (2450-2600)$ мм применяются в паропроводах перегретого пара атомных реакторов [18]. Их производство осуществляется горячей прокаткой из заготовки $400 \times 100 \times 1400$ мм на размер $260 \times 45 \times 5200$ мм с последующей механической расточкой и обточкой на готовый размер. Спрашивается, почему такой варварский подход к расходованию металла? На этом предприятии есть уникальный стан холодной прокатки (ХПТ450), на котором можно осуществить прокат передельной трубы на готовый размер. Если открыть ГОСТ 22897–86 «Трубы бесшовные холоднокатаные из титановых сплавов», там отсутствует марка ПТЗВ, т. е. большая вероятность получить трещины в металле при холодном переделе. А если осуществить прокатку на пике пластичности?

Рассмотрим механические свойства сплава ПТЗВ. Круглые образцы были изготовлены из материала передельных труб 260×45 мм и после термообработки имеем данные при $T = 20^\circ\text{C}$ [18]: $\sigma_b = 750$ МПа, $\sigma_{02} = 664$ МПа, $\delta_5 = 15\%$. Ударная вязкость $A_K KCU = 1,03-1,22$ МДж/м². Согласно ГОСТ 1497–84, при испытании образцов на растяжение скорость деформации $\dot{\epsilon} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$. В расчетах для титана приняли: $E = 105$ ГПа, $c = 3260$ м/с. Тогда из формул (3), (5) получим $\mu = 10,8$ ГПа $\cdot$ с; $A^* = 520$ ГДж/м²; $\delta_{5\text{max}} = 0,78$; $\dot{\epsilon} = 0,20 \cdot 10^{-1} \text{с}^{-1}$. Вполне реальная технологическая ситуация для проката с такой пластичностью и скоростью деформации. В качестве справки: на предприятии ООО «СУРА ЛТД» (г. Днепр) освоено производство холоднокатаных бесшовных труб на роликовых станах (ХПТР8-15) из сплавов титана ПТЗВ, ВТ6: $8 \times 0,5$ мм, $9,5 \times 0,40$ мм.

Формулы (2, 3) позволяют сформулировать генообразующую матрицу материала из семи параметров

$$(\sigma_b, \sigma_{02}, \delta_5, \mu, A^*, \dot{\epsilon}, T), \quad (6)$$

с помощью которых реально идентифицировать металлы и их сплавы относительно эксплуатационной надежности. В работе [39] на примере опытных данных оценки предела выносливости металлов, расчетно-экспериментальный метод идентификации на основе формул (2), (3), (6) имеет хорошую перспективу признания у металловедов.

Ниже рассмотрим достаточно разноплановые данные механических свойств различных сплавов, чтобы

попытаться ответить на вопрос: как сказывается изменение коэффициента динамической вязкости на эксплуатационной надежности материала. С параметром A^* определенная ясность есть. Эффективным способом повышения сопротивления усталости титановых фасонных отливок служит высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО), а также термоводородная обработка (ТВО). См., например, [40, 41].

Известны исследования ([42, табл. 4.3, с. 312]), где изучалось влияние на механические свойства и пористость отливок сплава ВТ20Л при различных режимах обработки. I – литое состояние (Л); II – Л + гомогенизирующий отжиг (ГО); здесь отжиг состоял из нагрева при 1000°C в течение одного часа в вакууме; III – Л + ГО + ВГО (950°C); ВГО осуществляли под давлением аргона в 155 МПа в течение двух часов; IV – Л + ГО + ВГО (950°C) + ТВО ($0,8\%$ Н). Термоводородная обработка (ТВО) состояла в наводороживании отливок до концентрации $0,8\%$ Н при постепенном понижении температуры от 850°C до 730°C и вакуумном отжиге при повышении температуры от 750°C до 800°C .

В табл. 1 сведены данные исследований [42], включая механические свойства отливок сплава ВТ20Л, значения ударной вязкости A_K (KCU), предел выносливости σ_{-1} на базе 10^7 циклов и пористость материала. Величины μ , A^* рассчитывались по формуле (2) при фиксированных параметрах: $c = 3260$ м/с, $E = 105$ ГПа, $\dot{\epsilon} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$, $T = +20^\circ\text{C}$. Из табл. 1 следует важный факт: со снижением пористости сплава существенно увеличиваются коэффициент динамической вязкости, а также удельная работа разрушения. То же самое можно утверждать по пределу выносливости. По ударной вязкости трудно что-либо спрогнозировать.

Из матрицы идентификации (6) по отношению к данным табл. 1 однозначно следует эффективность режима термообработки IV для сплава ВТ20Л. В этом случае параметры μ , A^* имеют максимальные значения и, как следствие, высокую эксплуатационную надежность.

Рассмотрим ферромагнитные стали 29НК, 47НД с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения. В справочнике [43, с. 235, табл. 147] приведены опытные данные по изучению анизотропии механических свойств сталей 39НК, 47НД. В табл. 2 приведены значения σ_b , σ_{02} , δ_5 и расчетные данные для μ , A^* по формуле (2) при $E = 200$ ГПа, $c = 5050$ м/с, $\dot{\epsilon} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$. Из табл. 2 следует, что наибольшее значение параметры μ , A^* имеют на образцах, вырезанных под углом 45° к оси прокатки, и минимальные – вдоль проката.

Интересно оценить метод идентификации относительно матрицы (6) на криогенных сплавах с особыми механическими свойствами. Рассмотрим сплав 36НХ [43, с.357, табл. 209]. Данные опытов σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ_5 ударной вязкости A_k (КСУ) при различной температуре испытаний и расчетные значения μ , A^* представлены в табл. 3. Вполне логично, что со снижением температуры при испытании растет удельная работа разрушения A^* . А почему снижается ударная вязкость A_k ? По сравнению с данными табл. 1 и 2, здесь параметр μ с понижением температуры теряет рост активности.

Другой пример со сплавом Х27Ю5Т, обладающим высокой жаростойкостью и высоким удельным электрическим сопротивлением. В табл. 4 представлены механические свойства [43, с. 327, табл. 187] и расчетные значения μ , A^* по формуле (2). Здесь наблюдается явная немонотонность изменения параметров μ , A^* от температуры испытания. Причем их экстремумы не совпадают.

Таким образом, представленный в статье расчетно-экспериментальный метод идентификации металлов относительно эксплуатационной надежности (патент РФ № 2715903 от 2020 г.) в виде формул (2) и (3) и матрицы (6) имеет ряд существенных преимуществ в сравнении с методами ударной вязкости (ГОСТ 9454–78), трещиностойкости (ГОСТ 25.506–85), предела выносливости [39]. А именно: здесь нет ограничений на толщину образца, скорость деформации, температуру испытаний. Метод основан на современных достижениях механики разрушения, экономичен и прост на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A., 1920, vol. 221.
2. Griffith A.A. The theory of rupture. Proc. First Internat Congress Appl. Mech., Delft, 1924.
3. Irwin G.R. Fracture dynamics. In. "Fracturing of Metals". – Cleveland : ASM, 1943.
4. Orowan E.O. Fundamentals of brittle behavior of metals. In "Fatigue and Fracture of Metals". – N. Y. : Wiley, 1950.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М. : Наука, 1974. – 395 с.
6. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.
7. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / отв. ред. Н. А. Махутов. 2-е изд. – М. : Книжный дом «Либроком», 2016. – 576 с.
8. Ивлев Д.Д. Об одном построении теории трещин // Инж. ж. Механика твердого тела. – М. 1967. № 6. С. 91 – 94.
9. Кузнецов В.М. О нестационарном распространении трещин в хрупком материале // Журнал прикладной механики и технической физики. Новосибирск, 1968. № 2. С. 118 – 127.
10. Лурьев А.И. Теория упругости. – М. : Наука, 1970. – 430 с.
11. Соколовский В.В. Теория пластичности. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
12. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М. : Физматгиз, 1960. – 235 с.
13. Ильюшин А.А. Деформирование вязкопластического тела. – М. : Учен. Зап. МГУ. Механика, 1940. Вып. 39. С. 3 – 81.
14. Пэжина П. Физическая теория вязкопластичности. В сб. Проблемы теории пластичности / под ред. Г.С. Шапи-ро. – М. : Мир, 1976. № 7. С. 91 – 110.
15. Кафка В. Теория медленных упругопластических деформаций поликристаллических металлов с микронапряжениями как скрытыми переменными описывающими состояние материала : В сб. Проблемы теории пластичности / под ред. Г.С. Шапи-ро. – М. : Мир, 1976. № 7. С. 123 – 147.
16. Прочность материалов и конструкций / отв. ред. В.Т. Тро-щенко. – Киев : Академперіодика, 2005. – 1088 с.
17. Пат. № 2257271 РФ. Способ изготовления длинномер-ных передельных труб большого и среднего диаметров для изготовления перископов АПЛ / Сериков С.В., Са-фьянов А.В. и др. ; заявл. 03.03.2004 ; опубл. 27.07.2005, Бюл. № 8.
18. Сафьянов А.В., Сериков С.В. Оценка эксплуатацион-ной надежности горячекатаных труб из сплава титана ПТЗВ // Титан. 2021. № 3. С. 43 – 46.
19. Сериков С.В. Особенности производства бесшовных труб из сплавов ниобия, тантала, титана // Титан. 2020. № 3 – 4. С. 82 – 85.
20. Сериков С.В. О скоростной деформации металлов // Известия АН СССР. Металлы. 1989. № 2. С. 48 – 52.
21. Сериков С.В. О механизме максимума пластичности ме-таллов в зависимости от скорости деформаций // Про-блемы прочности, Киев. 1991. № 9. С. 30 – 34.
22. Сериков С.В. Влияние локальных возмущений на разру-шение металлических колец взрывов // В сб.: Динамика сплошной среды. – Новосибирск : Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1974. Вып. 16. С. 94 – 100.
23. Пухначев В.В. Лекции по динамике вязкой несжимаемой жидкости. – Новосибирск : изд-во НГУ, 1969. – 198 с.
24. Овсяников Л.В. Общие уравнения и примеры. Задача о неустановившемся движении жидкости со свободной границей. – Новосибирск : СО АН СССР, 1967. – 205 с.
25. Лаврентьев М.А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М. : Наука, 1973. – 416 с.
26. Сериков С.В. Правда о металлах. – Saarbrücken: Palmarium Akademik Publishing (Deutschland), 2014. – 84 с.
27. Сериков С.В. Исследование деформации и разрушения титановых сплавов методами моделирования // Титан. 2006. № 1. С. 53 – 56.
28. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности. – М. : На-ука, 1966. – 187 с.
29. Сериков С.В. Двуосная неустановившаяся деформация прямолинейной полосы в схеме сжимаемой вязкопла-стической среды // Журнал прикладной механики и тех-нической физики. Новосибирск. 1982. № 6. С. 123 – 133.
30. Сериков С.В. Нестационарное растяжение вязкопла-стической прямолинейной полосы. – В сб.: Динамика сплошной среды. – Новосибирск : изд. Института ги-дродинамики СО АН СССР, 1981. Вып. 49. С. 100 – 106.
31. Сериков С.В. Неустановившаяся деформация круглого прутка в схеме сжимаемой вязкопластической среды. В сб.: Динамика сплошной среды. – Новосибирск : изд. Института гидродинамики СО АН СССР, 1982. Вып. 55. С. 79 – 90.
32. Сериков С.В. Прогнозирование предельной деформации при растяжении в динамике металлического круглого прутка. В сб.: Прикладные проблемы прочности и пла-стичности. – Горький : изд. Горьковского университета, 1989. С. 100 – 108.

33. **Сериков С.В.** Об устойчивости вязкопластического кольца // Журнал прикладной механики и технической физики. Новосибирск. 1984. № 1. С. 157 – 168.
34. **Сериков С.В.** Оценка предельной деформации при разрушении металлических труб под действием интенсивных нагрузок // Журнал прикладной механики и технической физики. Новосибирск. 1987. № 1. С. 155 – 161.
35. **Сериков С.В.** Неустановившаяся деформация шара из вязкопластического сжимаемого материала. В сб.: Динамика сплошной среды. – Новосибирск : изд. Института гидродинамики СО АН СССР, 1985. Вып. 71. С. 109 – 124.
36. **Сериков С.В.** Оценка осколкообразования при разрушении шаровой оболочки // Журнал прикладной механики и технической физики. Новосибирск. 1982. № 3. С. 125 – 132.
37. **Иванов А.Г.** Особенности взрывной деформации и разрушения труб // Проблемы прочности. Киев. 1976. № 11. С. 50 – 52.
38. Пат. 2685118 РФ. Способ определения пика пластичности для металлов / Сериков С.В., Савин В.В. ; заявл. 14.1.2017 ; опубл. 16.04.2019, Бюл. № 11.
39. **Сериков С.В.** Оценка предела выносливости металлов // Сталь. 2023. № 8. С. 46 – 49.
40. **Serikov S.V.** Evaluation of Endurance Limit of Metals // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. № 9. P. 842 – 845.
41. **Фомичева Т.И., Ключкова Н.П., Ходоровский Г.Л.** // Литейное производство. 1993. № 4. С. 17 – 18.
42. **Ильин А.А., Колачев Б.А.** и др. Водородная технология титановых сплавов. – М. : МИСиС, 2002. – 392 с.
43. **Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С.** Титановые сплавы. Состав, Структура, Свойства : справочник. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
44. **Прецизионные сплавы** : справ. изд. / под ред Б.В. Молотилова. – М. : Metallurgia, 1983. – 439 с.

Статья поступила 31.10.2023