

УДК 539.3

*А.Ю. Кузькин, Д.В. Латышев,
М.Ю. Петров, В.А. Попов*

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ
В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО И ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ**

*A.Yu. Kuzkin, D.V. Latyshev,
M.Yu. Petrov, V.A. Popov*

**THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS
WITH THE STATIC LOAD OF TUBULAR MODELS
UNDER THE CONDITIONS
OF THE FLAT AND VOLUMETRIC STRESSED STATES**

Приведено описание установки для испытаний тонкостенных трубчатых образцов в условиях плоского и объемного напряженных состояний при двух- или трехпараметрическом нагружении давлениями жидкости до 1000 МПа. Экспериментальной проверке подвергалась гипотеза существования универсальной зависимости между интенсивностями деформаций и напряжений. Сообщается об экспериментах по изучению устойчивости пластического деформирования изотропных и начально анизотропных металлов. Подчеркнута актуальность экспериментальных исследований вязкоупруго-пластических процессов на современном этапе развития механики деформируемого твердого тела.

МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ; ПУТИ НАГРУЖЕНИЯ; УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ; ГИПОТЕЗА ЕДИНОЙ КРИВОЙ; ВЯЗКОУПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.

The description of installation for the tests of thin-walled tubular models under the conditions of the flat and volumetric stressed states with two- or three-parameter load is given by the pressures of liquid to 1000 MPa. The hypothesis of existence of universal dependence between the intensities of deformations and stresses underwent the experimental check. It communicates about the experiments on the study of the stability of the plastic deformation of isotropic and initially anisotropic metals. Is emphasized the urgency of experimental studies of viscoelastically plastic processes in present development stage of the mechanics solid of body being deformed.

MODEL OF THE INELASTIC BEHAVIOR OF MATERIALS; INSTALLATION FOR THE TESTS; IT IS VISCOELASTIC DUCTILE PLASTIC PROCESS.

В последнее время наблюдаются попытки создания все более сложных моделей неупругого поведения материалов [1–6], в частности построение определяющих соотношений вязкоупруго-вязкопластических тел при разнообразных путях нагружения, которые учитывают зависимость скорости деформирования от температуры и времени, а также анизотропию вследствие предварительной пластической деформации.

Для обоснования этих моделей требуются весьма сложные многоплановые эксперименты. Например, для описания определяющих соотношений реологических процессов в [4] использованы одна материальная функция и девять материальных параметров (ползучесть, релаксация, длительная прочность, деформирование с постоянной скоростью и др.), устанавливаемых по результатам различных испытаний.

Для осуществления названных экспериментов создаются высокопроизводительные автоматизированные испытательные комплексы. Назовем некоторые из них.

Испытательная машина СН [7] позволяет в двумерном пространстве автоматически воспроизводить программную траекторию деформирования трубчатого образца, подвергаемого растяжению и кручению. По сути, эта машина стала прототипом других комплексов, обеспечивающих программные пути в трехмерном пространстве деформаций.

В экспериментальном комплексе О.Л. Толоконникова [8] трубчатый образец деформируется в условиях нагружения по схеме $p_v + p_n + P$, где p_v , p_n — внутреннее и наружное давления, P — независимая осевая сила. Комплекс содержит блоки управления, автоматической регистрации параметров нагрузки и коррекции программы в ходе опыта с помощью ЭВМ. Максимальное рабочее давление, достигаемое в комплексе, составляет 2500 МПа.

Автоматизированный стенд, разработанный в АН УССР [9], предназначен для испытаний тонкостенных трубчатых образцов нагружением осевой силой и внутренним давлением ($P + p_v$), осевой силой и крутящим моментом ($P + M_k$) в условиях статического и циклического действий нагрузки при различных видах напряженного состояния и широком диапазоне температур. Комплекс оснащен системами автоматической регистрации и измерений усилий и деформаций, а также регулирования температуры. Стенд дает возможность также изучать вязкопластические характеристики материалов по специальной методике испытаний на ползучесть при различных уровнях необратимой деформации и скорости деформирования.

Приведенный краткий обзор позволяет заключить: разработка, создание и обслуживание подобных высокопроизводительных испытательных комплексов требуют привлечения специалистов из самых различных отраслей инженерных знаний, а материальные и финансовые затраты могут оказаться неприемлемыми.

Многие страны производят оборудование для изучения механических свойств материалов. Например, фирмы «Инстрон» в Англии, «Шоппер» в Германии, «MTS» в США, «Шимадзу-Сейсакушо» в Японии и другие выпускают ма-

шины для двух- или трехпараметрического нагружения трубчатых образцов в условиях сложного деформирования при различных уровнях автоматизации процесса. Заметим, что эти машины преимущественно предназначены для проведения унифицированных испытаний в рамках государственных стандартов и согласованных международных рекомендаций. Кроме того, их стоимость высока.

В свете изложенного понятно, что создание и эксплуатация более простых, не чрезмерно затратных установок, ориентированных на виды испытаний, которые затруднительны на выпускаемых промышленностью машинах, вполне уместными. Следует упомянуть, что многие оригинальные, опубликованные в печати результаты были получены благодаря испытаниям материалов на такого рода сравнительно простых установках.

Установка для экспериментов над трубчатыми образцами в условиях плоского и объемного напряженных состояний

В течение многих лет мы проводили экспериментальные исследования пластических и реологических свойств металлов при нормальной температуре. Опыты проводились в установках [10, 11], обеспечивающих мягкое трехпараметрическое нагружение (по схеме $p_v + p_n + P$) тонкостенных трубчатых образцов. Эти установки подвергались непрерывной модернизации с целью повышения производительности, точности и видов эксперимента. Приведем краткое описание последней конструкции, отмечая усовершенствования, выполненные в последние годы.

Установка состоит из испытательной камеры, источников давления, трубопроводов, приборов для измерения давлений, соединительной и запорной арматуры.

На рис. 1 представлена принципиальная схема соединения источников давления (насосы) с полостями рабочей испытательной камеры 1. Видно, что при закрытых вентилях 2 нагрузки — внутреннее давление p_v , наружное p_n и давление p_o под плунжером, передающим на образец осевую силу, — создаются насосами 3 независимо друг от друга по режиму, предписанному программой нагружения.

В общем случае образец деформируется путем последовательного ступенчатого изменения

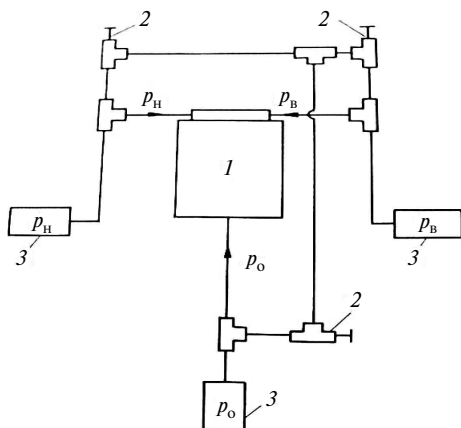


Рис. 1. Принципиальная схема установки

давлений. При некоторых сочетаниях параметров открытых и закрытых вентилях осуществляется бесступенчатое нагружение при различных уровнях шаровой части тензора напряжений.

Испытательная камера. Испытательная камера (рис. 2), рассчитанная на максимальное рабочее давление в 1000 МПа, состоит из двух частей.

Верхняя часть — двухслойный сосуд, у которого внутренний корпус 1 выполнен из термообработанной до твердости HRC₃ 44–48 стали

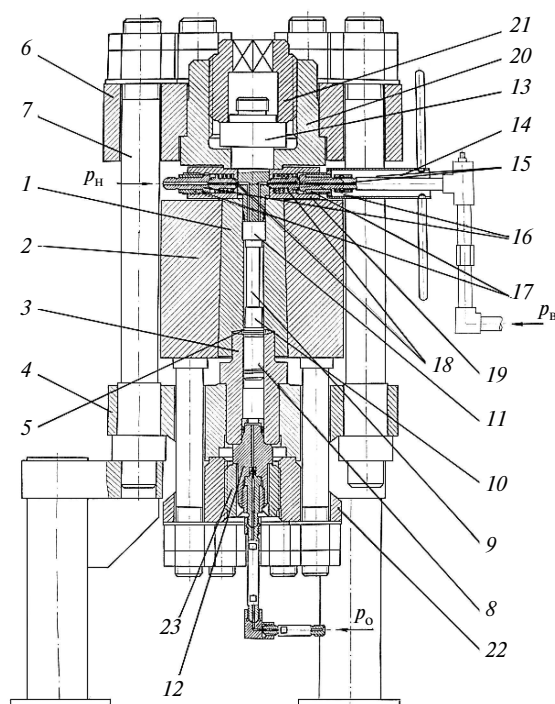


Рис. 2. Испытательная камера

38ХНЗМА. Диаметр рабочей полости корпуса составляет 36 мм. Для изготовления обоймы 2 названного сосуда была использована поковка из низколегированной стали. В ходе создания обоймы была автофретирована внедрением закаленного мастер-пуансона, имитирующего внутренний корпус, с усилием около десяти тысяч килоньютон. Внутренний корпус и обойма тщательно притерты друг к другу по конической поверхности с углом конуса 3°.

Нижняя часть камеры состоит из массивной плиты 4, в которую запрессована втулка 3, изготовленная из стали Х12М, термообработанной до твердости HRC₃ 56–60. Требуемый натяг был рассчитан из условия прочности втулки при самых высоких рабочих давлениях. Перед соединением плита нагревалась до 300 °С, а втулка охлаждалась жидким азотом; тем самым гарантировано обеспечивалось нужное соединение.

Верхняя и нижняя части камеры посредством коллектора 19, опирающегося на торец внутреннего корпуса, втулки 20, массивной плиты 6 и шести колонок 7 были стянуты во время сборки с усилием около тысячи килоньютон. Вследствие пластической деформации двусторонней конической линзы 5 обеспечивается плотность соединения частей камеры. Камера герметизируется сверху при помощи пуансона 13, прижимаемого гайкой 21, снизу — пуансоном 12 и гайкой 23, которая ввинчивается в плиту 22. Усилия, создаваемые давлением жидкости на торцы запорных пуансонов, реверсируются в сжимающие силы, которые обеспечивают дополнительную радиальную поддержку внутреннего сосуда. Таким образом, в отличие от двухслойных установок подобного рода, в которых осевое усилие осуществляется за счет внешнего источника (пресс), здесь это усилие создается автоматически в ходе эксперимента.

В верхнем запорном пуансоне высверлены отверстия, завершающиеся сферическими углублениями по противоположным концам диаметра его цилиндрической поверхности. Эти каналы служат для подвода рабочей жидкости в наружную и внутреннюю полости образца. Соединение с трубопроводом высокого давления происходит следующим образом. В полостях коллектора 19 размещаются штуцеры 15 с пружинами 18 на них и патрубки 16 с гайками 17 (рис. 3). На шестигранные поверхности гаек надеваются стационарные приспособления 14.

При рабочем положении пуансона гайки ввинчиваются в резьбовые отверстия коллектора, смещая патрубки и штуцеры. При этом преодолеваются усилия пружин, и штуцеры своими сферическими оголовками со значительным усилием прижимаются к соответствующим поверхностям пуансона. При обратном действии, т. е. при вывинчивании гаек 17 приспособлениями 14, пружины, освобождаясь, отжимают штуцеры из сферических углублений пуансона. Теперь после извлечения гайки 21 (см. рис. 2) пуансон с помощью съемного приспособления извлекается из полости камеры. Патрубки 16 противоположными концами соединяются с трубопроводами и далее с источниками давления. Штуцеры и патрубки изготовлены из высокопрочной закаленной стали и имеют полированные поверхности контакта.

Рассмотренная схема подвода внутреннего и наружного давлений в полости образца потребовала строго определенного положения пуансона как в осевом, так и в окружном направлениях. Окружная фиксация была достигнута посредством направляющей шпонки, по которой пуансон вводится в полость камеры, а осевая — набором медных прокладок, размещенных между опорными поверхностями пуансона и коллектора.

Уплотнительными элементами служили кольца из фторопласта. Для самых высоких давлений оказалось достаточным применение дополнительных прокладок из отожженной меди. В качестве рабочей среды применялась жидкость АМГ-10.

Источники давления. В качестве источников давления используются ручные плунжерные насосы (рис. 4). В корпусе 1 размещаются плунжер 2 высокого давления диаметром 4 мм, цилиндр 3, всасывающий (5) и нагнетательный (6) клапаны. В корпус встроены также вентиль 7 точного снижения давления и два манганиновых датчика сопротивления 8. Назначение остальных деталей и узлов ясно из рисунка и не требует специальных пояснений.

Остановимся лишь вкратце на работе вентиля 7 и уплотнении плунжера. Известно, что при испытании трубчатых образцов давлениями жидкости серьезной проблемой является плавное снижение параметра нагрузки. Применение обычных вентилях приводит к резкому сбрасыванию давления и нарушению предписанной программы нагружения. Для преодоления этой

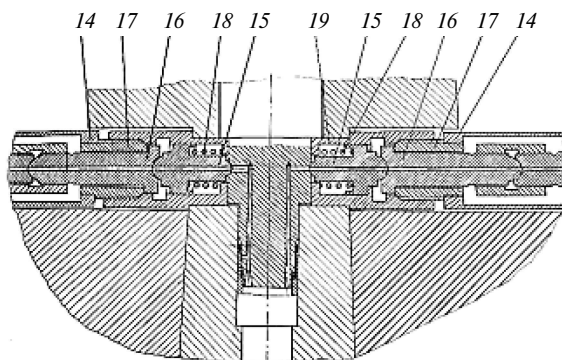


Рис. 3. Подвод рабочей жидкости во внутреннюю и наружную полости образца

трудности применяют вентили плавного снижения давления. Принцип действия последнего известен из [12]. За один оборот шпинделя 15 запорная игла 16 перемещается на расстояние, равное разности шагов резьбы шпинделя и хвостовика иглы. В нашем случае это перемещение составляет 0,1 мм. В уплотнении плунжера, известном в литературе как уплотнение Моррисона [13] (см. рис. 4, выноска Б), используется принцип некомпенсированной площади. Здесь таковой является поперечное сечение горловины 10. Давление в мягкой прокладке 11, превышающее давление под плунжером 2, обжимает горловину вокруг плунжера, предотвращая тем самым утечку жидкости. Стальные кольца 12 треугольного поперечного сечения препятствуют вытеканию прокладки в зазоры. С помощью втулки 13 обеспечивается начальное сжатие прокладки.

Из конструкции уплотнения понятно, что сила трения между плунжером и горловиной будет тем меньше, чем тоньше стенка горловины. Опытным путем была установлена оптимальная толщина стенки — 0,5 мм. Плунжер и горловина изготовлены из высокопрочных инструментальных сталей, подвергнутых термообработке до твердости HRC₃ 54–58, и тщательно притерты друг к другу. Недопустимы продольные риски на поверхности контакта названных деталей, поскольку через них возможна утечка жидкости высокого давления.

Трубопроводы и арматура. Насосы соединены с рабочей камерой трубопроводами высокого давления, которые собраны из одинаковых элементов — штуцеров 1 и соединительных муфт 2 (рис. 5).

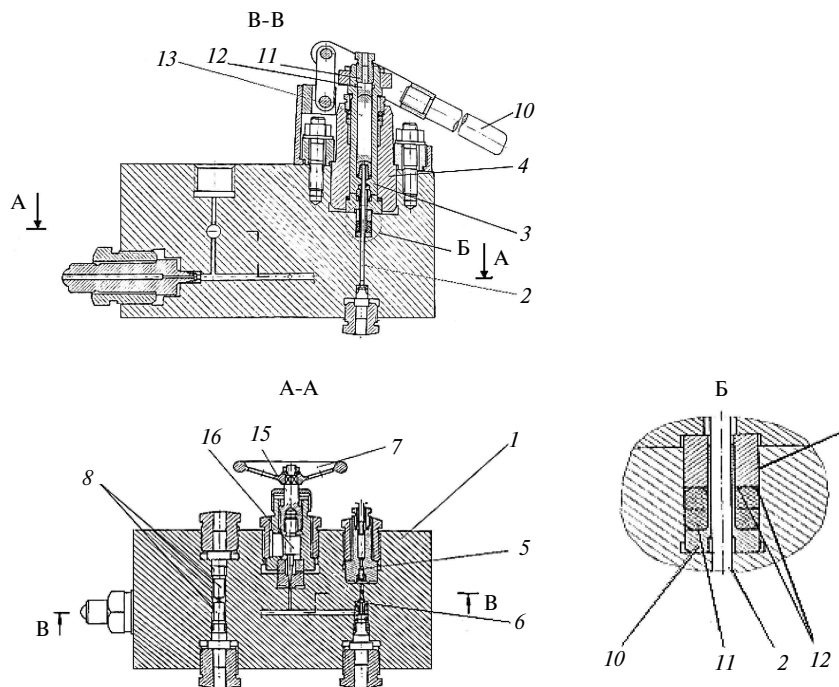


Рис. 4. Ручной плунжерный насос

Штуцеры изготовлены из стали X12M и подвержены термообработке до твердости HRC₃ 44–48. Они имеют на одном конце сферический оголовок и правую резьбу, на другом — сферическое углубление и левую резьбу. На противоположных сторонах муфты также выполнены правая и левая нарезки. Соединение двух штуцеров осуществляют вращением муфты, при этом соединяемые детали совершают лишь поступательные движения навстречу друг другу. Размеры штуцеров: наружный диаметр — 27 мм, диаметр отверстия — 4 мм, по длине они были изготовлены двух видов — 120 мм и 200 мм. Сферические поверхности штуцеров тщательно отполированы. Изменение направления трубопроводов достигается посредством угольников.

Для сообщения и разобщения полостей — наружной и внутренней образца, а также рас-

положенной под торцом плунжера, передающего на образец осевую силу, — использовался игольчатый запорный клапан, известный по экспериментам Бриджмена.

Захваты для крепления образцов. При экспериментальном изучении таких явлений, как, например, влияние вида напряженного состояния или шаровой части тензора напряжений на предельную деформируемость, кривые деформирования металлов и т. п., большое значение имеет повторяемость результатов опыта. Добиться последней при испытании образцов, выточенных из прутка, практически невозможно. Поэтому в опытах использовались образцы*, нарезанные из тонкостенных цельнотянутых труб. Для закрепления этих образцов были сконструированы специальные захваты нескольких видов.

Измерения давлений и перемещений. Давления измерялись пружинными манометрами. Использовались образцовые манометры с диапазонами измерений 0–100, 0–400, 0–600 и 0–1000 кг/см².

* Первоначальные размеры образцов составили: наружный диаметр — $d_n = 26,4$ мм, толщина стенки — $t = 0,3$ мм. Разностенность не превышала 0,01 мм. Механические свойства материала образцов согласно сертификату таковы: $\sigma_{0,2} = 325$ МПа, $\sigma_5 = 45\%$, $\sigma = 60\%$.

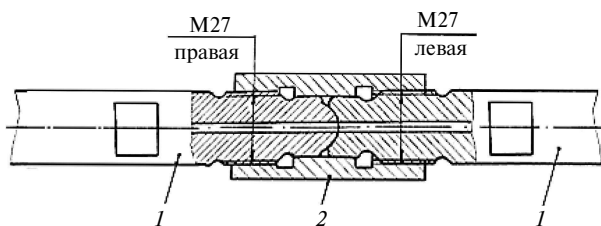


Рис. 5. Соединение деталей трубопровода

Все манометры подвергались тщательной проверке посредством грузопоршневого манометра МП-2500 с последующей регулировкой.

Измерения наружного диаметра и базовых длин на рабочей части образца производились с равной точностью соответственно при помощи микрометра и разметочного штангенциркуля*. Осевую и окружную логарифмические деформации подсчитывали по известным формулам

$$\varepsilon_z = \ln \frac{L}{L_0}, \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{d_{cp}}{d_{cp0}}. \quad (1)$$

Радиальная деформация

$$\varepsilon_r = \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (2)$$

находилась из условия постоянства объема:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0. \quad (3)$$

Здесь L , d_{cp} , t и L_0 , d_{cp0} , t_0 — соответственно текущие и начальные базовая длина, средний диаметр и толщина стенки образца.

Векторное представление тензоров. Двумерное пространство напряжений и деформаций Прагера — Ильюшина

Напряжения, возникающие в образце. В рассмотренной установке направления главных осей тензора напряжений остаются неизменными во всех опытах. Предполагается, что распределение напряжений остается однородным вплоть до локализации деформаций. При этом напряжения — осевое σ_z , окружное σ_θ , радиальное σ_r — вычисляются по формулам [14, 15]

$$\begin{aligned} \sigma_z &= (p_B - p_H) \frac{d_{cp}}{4t} - \frac{1}{2} (p_B + p_H) + (p_H - p_0) \frac{d_0^2}{4d_{cp}t}; \\ \sigma_\theta &= (p_B - p_H) \frac{d_{cp}}{2t} - \frac{1}{2} (p_B + p_H); \\ \sigma_r &= -\frac{1}{2} (p_B + p_H), \end{aligned} \quad (4)$$

где d_0 — диаметр плунжера, передающего на образец осевую силу.

Таким образом, в установке могут быть реализованы напряженные состояния в диапазоне от осевого до кольцевого растяжений при различных уровнях шаровой части тензора напряжений.

Пути нагружения и деформирования в девиаторных плоскостях напряжений и деформаций.

* Цена деления микрометра — 0,01 мм, штангенциркуля — 0,05 мм, но при этом базовый размер по образующей в 4–5 раз превышал диаметр образца.

При составлении программы опытов, выборе путей и методики нагружения, обработке результатов эксперимента использовали векторное представление тензоров, введенное Прандтлем [16] и Прагером [17] и развитое впоследствии А.А. Ильюшиным [18]. Это представление сводится к следующему: поскольку умеренное гидростатическое давление оказывает слабое влияние на пластические свойства металлов [19] и, кроме того, пластически деформируемый металл практически несжимаем, то напряженное состояние можно характеризовать девиатором напряжений, а соответствующее деформированное — девиатором деформаций. Таким образом, в общем случае названные девиаторы — напряжений и деформаций — могут быть представлены векторами в соответствующих пятимерных пространствах. При нагружении тонкостенной трубы наружным, внутренним давлениями и осевой силой напряженное и деформированное состояния задаются векторами в соответствующих двумерных пространствах. При этом компоненты векторов напряжений и деформаций соответственно определяются выражениями

$$\Sigma_1 = \sigma_z - \frac{\sigma_\theta}{2} - \frac{\sigma_r}{2}; \quad \Sigma_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta - \sigma_r); \quad (5)$$

$$E_1 = \varepsilon_z; \quad E_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (\varepsilon_z + 2\varepsilon_\theta). \quad (6)$$

Компоненты названных векторов связывают с обобщенными (инвариантными относительно вида напряженного состояния) мерами напряженного и деформированного состояний формулами

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\Sigma_1^2 + \Sigma_2^2}; \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon} = \int \sqrt{dE_1^2 + dE_2^2}. \quad (8)$$

Здесь $\bar{\sigma}$ и $\bar{\varepsilon}$ — интенсивности напряжений и деформаций.

Таким образом, траектория нагружения материала со свойствами, не зависящими от среднего нормального напряжения σ_{cp} , (шаровая часть тензора напряжений) определяется некоторой кривой, расположенной в девиаторной плоскости.

Пропорциональный путь нагружения в плоскости Σ_1 , Σ_2 можно задать углом вида напряженного состояния

$$\operatorname{tg} \psi = \Sigma_2 / \Sigma_1, \quad (9)$$

где ψ отсчитывается от оси Σ_1 .

Лучи $\psi = 0^\circ$, $\psi = 120^\circ$ в названной плоскости представляют осевое и кольцевое растяжения. Для характеристики плоского напряженного состояния ($\sigma_r \approx 0$) используют параметр $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z$. С учетом (5) легко устанавливается зависимость

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2-\alpha}. \quad (10)$$

Введенные в рассмотрение и использованные в дальнейшем пространства напряжений и деформаций получили в литературе названия пространств Прагера — Ильюшина.

Результаты некоторых экспериментальных исследований

Ниже приведены результаты некоторых исследований, осуществленных на описанной выше установке [15, 20].

Гипотеза единой кривой. В теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина названная гипотеза формулируется как закон упругопластического упрочнения, согласно которому при любом сложнапряженном состоянии и простом (пропорциональном) нагружении существует универсальная (то есть инвариантная относительно вида напряженного состояния) зависимость между интенсивностью деформаций $\bar{\epsilon}$ и интенсивностью напряжений $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \Phi(\bar{\epsilon}). \quad (11)$$

Здесь $\bar{\sigma} = \sqrt{3I_2(D_\sigma)} = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$;

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{4}{3}I_2(D_\epsilon)} = \sqrt{\frac{2}{3}\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}}, \quad (12)$$

где $I_2(D_\sigma)$, $I_2(D_\epsilon)$ — вторые инварианты соответственно девиаторов напряжений и деформаций; σ'_{ij} — компоненты девиатора напряжений; ϵ_{ij} — компоненты тензора деформаций ($\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij}$ вследствие условия постоянства объема).

Результаты экспериментов, как подтверждающие рассматриваемый закон, так и противоречащие ему, проанализированы А.М. Жуковым [21]. Здесь сообщим результаты наших опытов.

Из одной цельнотянутой трубы стали Х18Н10Т нарезались две партии образцов. Образцы первой партии без какой-либо механической или термической обработки испытывались по лучам $\psi = 0, 30, 60, 90$ и 120° до разрушения. Образцы, принадлежащие второй партии, предварительно деформировались по лучу $\psi = 30^\circ$ до уровня остаточной деформации $\bar{\epsilon} = 0,149$ (таким образом создавалась начальная анизотропия). Затем эти образцы подвергались нагружению по тем же пропорциональным путям вплоть до локализации деформаций и (или) разрушения [20]. По результатам испытаний образцов обеих партий были построены кривые $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$ (рис. 6).

У исходных образцов наибольшее расхождение кривых по напряжениям составляло 7%. Максимальное расхождение графиков у предварительно деформированных образцов не

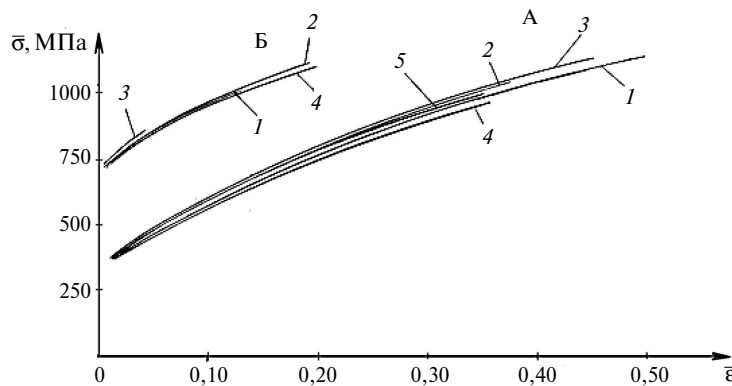


Рис. 6. Кривые $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$, построенные по результатам испытаний исходных и предварительно деформированных образцов:

- А — исходный материал; 1 — $\psi = 0$; 2 — $\psi = 30$; 3 — $\psi = 60$;
4 — $\psi = 90$; 5 — $\psi = 120$
Б — начально анизотропный материал; 1 — $\psi = 0$; 2 — $\psi = 60$;
3 — $\psi = 90$; 4 — $\psi = 120$

превышало 1,8 %. Имело место резкое увеличение сопротивления при существенном уменьшении предельных равномерных деформаций. Расположение кривых на рисунке позволяет заключить: как для исходного, так и для предварительно деформированного (начально анизотропного) материала вполне приемлема гипотеза единой кривой.

Линейность путей деформирования. Расхождение результатов эксперимента с предсказаниями теории некоторые исследователи объясняют влиянием приобретенной в ходе испытаний деформационной анизотропии, подтверждением которой может служить нарушение линейности траекторий деформирования, отвечающих путям пропорционального нагружения. Нами была произведена проверка линейности для простых (пропорциональных) путей нагружения. На рис. 7 представлены результаты, из которых следует, что на всех рассмотренных путях деформирования в промежутке однородных пластических деформаций (0,002–0,400) не наблюдается систематических отклонений экспериментальных точек от прямых линий.

Экспериментальная проверка возможности применения теории Р. Хилла для исследования деформирования металлов с ортотропной анизотропией. Теория пластичности анизотропных металлов, предложенная Р. Хиллом [19], широко используется в инженерной практике. В то же время мало работ, посвященных ее экспериментальной проверке [22–24]. Поскольку результаты названных работ весьма разноречивы, тщательная и разносторонняя проверка рассматриваемой теории вполне оправданна. Приведем ее основные положения.

Эта теория не учитывает деформационную анизотропию и справедлива только для ортотропных металлов. Упрочнение предполагают изотропным. Вводят понятия эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}$ и приращения эквивалентной деформации $d\bar{\epsilon}$, аналогичные таковым в теории пластичности изотропных металлов. Допускается функциональная зависимость $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(w_p)$ между эквивалентным напряжением и пластической работой w_p , отнесенной к единице объема. Функция нагружения (условие пластичности) имеет вид

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + G(\sigma_r - \sigma_z)^2 +$$

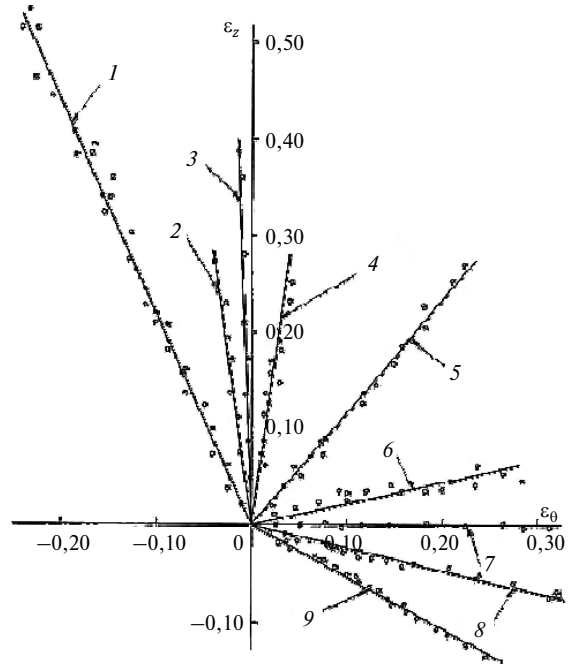


Рис.7. Проверка линейности путей деформирования, отвечающих путям пропорционального нагружения при углах, равных $\psi = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120^\circ$

1 — $\psi = 0^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0$); 2 — $\psi = 15^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,27$);
3 — $\psi = 30^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,5$); 4 — $\psi = 45^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,73$);
5 — $\psi = 60^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 1,0$); 6 — $\psi = 75^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 1,37$);
 $\psi = 90^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 2,0$); 8 — $\psi = 105^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 3,73$);
9 — $\psi = 120^\circ$ ($\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = \infty$)

$$+ H(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 2L\tau_{\theta r}^2 + 2M\tau_{rz}^2 + 2N\tau_{z\theta}^2 = 1, \quad (13)$$

где $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$ — компоненты тензора напряжений; F, G, H, L, M, N — текущие параметры анизотропии.

Закон течения, ассоциированный с условием пластичности, определяется выражением

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (14)$$

где $d\lambda$ — множитель Лагранжа.

Поскольку f — пластический потенциал — совпадает с функцией нагружения, то согласно теореме Эйлера об однородных функциях получаются соотношения

$$dw_p = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = \sigma_{ij} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda = 2fd\lambda = d\lambda, \quad (15)$$

где dw_p — приращение пластической работы, отнесенное к единице объема.

Кроме того, согласно [19] имеет место равенство

$$dw_p = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}. \quad (16)$$

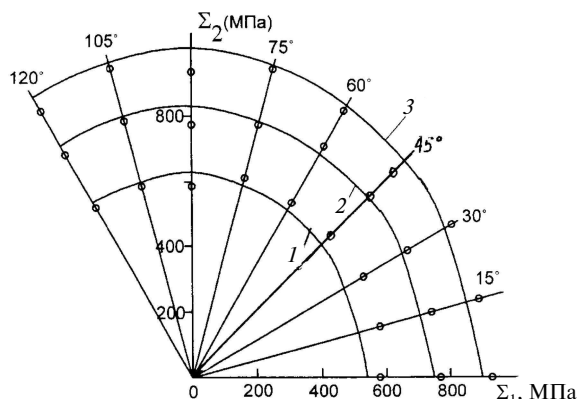


Рис. 8. Теоретические кривые нагружения при различных уровнях пластической работы.

○ — экспериментальные значения эквивалентного напряжения при трех значения W_p : 1 — $W_p = 29,00$ Мдж/м³; 2 — $W_p = 102,58$ Мдж/м³; 3 — $W_p = 194,56$ Мдж/м³

Все подробности исследования, связанного с экспериментальной проверкой теории Хилла, приведены в нашей работе [25]. Здесь напомним только основной результат и выводы.

Поскольку теория предполагает совпадение функции нагружения и пластического потенциала, целесообразно оценку теории произвести, сравнивая кривые нагружения при постоянных уровнях пластической работы. Такое сравнение для трех значений пластической работы приведено на рис. 8. Теоретические значения $\bar{\sigma}$ для каждого пути и соответствующего уровня пластической работы наносились на лучи в плоскости Σ_1 , Σ_2 и соединялись кривыми.

Здесь же нанесены точки, определяющие экспериментальные значения эквивалентного напряжения.

По итогам проведенных экспериментов можно заключить: для использованной в опытах

хромоникелевой стали X18H10T в изученном диапазоне пропорциональных путей нагружения (и, по-видимому, для иных путей малой кривизны) все основные положения теории пластического течения Хилла для ортотропного металла подтверждаются с достаточной для практических целей точностью.

Заклячая статью, сформулируем некоторые выводы.

По сути, настоящая работа освещает некоторые результаты наших исследований в области экспериментальной пластичности и обработки металлов давлением за последние более чем тридцать лет. К сожалению, здесь оказались не затронутыми вопросы потери устойчивости пластического деформирования изотропных и анизотропных металлов, весьма важные для приложений, эксперименты по пластическому деформированию металлов по ломаным (двух- или трехзвенным) траекториям. Последние посвящались в основном проверке гипотез и постулатов деформационной теории пластичности. Не названы также результаты исследования кратковременной ползучести хромоникелевой стали при нормальной температуре [26, 27]. Тем не менее экспериментальные исследования подобного рода играют важную роль в понимании упругопластических, а также вязко-упруго-пластических процессов, в подтверждении или опровержении гипотез механики деформируемого твердого тела, многие из которых и по сегодняшний день остаются спорными. Кроме того, результаты таких исследований могут внести полезный вклад в разработку новых технологических процессов обработки материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горохов М.Ю., Мельников Б.Е., Семенов А.С. Циклическая нестабильность при расчетах больших упругопластических деформаций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2003. № 3(33). С. 129.
2. Грешнов В.М. Модель вязкопластического тела с учетом истории нагружения // Изв. РАН. МТТ. 2005. №2. С. 117–125.
3. Пелешко В.А. К построению определяющих соотношений вязкоупругости и ползучести при нестационарных и сложных нагружениях // Изв. РАН. МТТ. 2006. №3. С. 144–165.
4. Хохлов А.В. Определяющее соотношение для реологических процессов: свойства теоретических кривых ползучести и моделирование затухания памяти // Изв. РАН. МТТ. 2007. №2. С. 147–165.
5. Бондарь В.С. Варианты теории неупругости // Изв. РАН. МТТ. 2011. №1. С. 90–95.
6. Мельников Б.Е., Семенов А.С., Семенов С.Г. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. № 53. С. 85–92.

7. **Богатырев И.С., Ильюшин А.А., Ленский В.С., Панферов В.М.** Машина СН для исследования пластического деформирования металлов при сложном нагружении // Инженерный журнал, 1961. №2. С. 150–163.
8. **Толоконников О.Л.** О влиянии гидростатического давления на конечное формоизменение несжимаемого материала // Общие задачи и методы исследования пластичности и вязкоупругости материалов и конструкций: Сборник АН СССР. / Уральский научный центр. 1986. С. 110–115.
9. **Гигиняк Ф.Ф., Шкодзинский О.К., Федоров Р.К., Сторчак М.В., Башта В.В.** Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1991. №10. С. 70–74.
10. **Ягн Ю.И., Изотов И.Н., Митюков А.Г.** Установка для испытаний материалов при объемном напряженном состоянии // Заводская лаборатория, 1973. №1. С. 92–94.
11. **Павлов П.А., Изотов И.Н., Кузнецов Н.П., Митюков А.Г., Симаненок А.Н.** Установка для испытаний материалов при объемном напряженном состоянии // Проблемы прочности, 1986, №2. С. 104–107.
12. **Шаховский Г.П. Гоникберг М.Г.** Вентиль точной регулировки // Приборы и техника эксперимента, 1966. №1. С. 218.
13. **Бриджмен П.** Физика высоких давлений / ОНТИ НКТП СССР. М., Л., 1935. 402 с.
14. **Мельников Б.Е., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А.** Испытание трубчатых образцов в условиях кольцевого растяжения // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 77–79.
15. **Изотов И.Н., Кузнецов Н.П., Мельников Б.Е., Митюков А.Г.** Упругопластическое поведение стальных трубчатых образцов при сложном трехосном нагружении // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2003. № 3. С. 114.
16. **Prandtl L.** Spannungsverteilung in plastischen Körper, Verhandl // d. I Jnt. Kongr. Für tech Mechanik, 1924.
17. **Прагер В.** Влияние деформации на условие пластичности вязко-пластических тел // Теория пластичности: Сб. статей. М., 1948. С. 291–301.
18. **Ильюшин А.А.** О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред // ПММ. 1954. Т. XVIII, Вып. 6. С. 641–666.
19. **Хилл Р.** Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
20. **Кузькин А.Ю., Мельников Б.Е., Митюков А.Г., Попов В.А.** Об использовании гипотезы «единой» кривой при исследовании неустойчивости пластического деформирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 48, Т. 1. С. 85–88.
21. **Жуков А.М.** Некоторые особенности поведения металлов при упруго-пластическом деформировании // Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 30–57.
22. **Фредеркинг Р.М., Сайдботтом О.М.** Экспериментальная проверка теорий пластичности анизотропных металлов // Труды АОИМ. 1971. С. 14–21.
23. **Дилламор И.Л., Дж. Хейзел, Уотсон Т.В., Хедден П.** Экспериментальное изучение механической анизотропии некоторых общепотребительных металлов: Сб. переводов // Механика, 1972. №5. С. 134–147.
24. **Кузькин А.Ю., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А.** Экспериментальная проверка теории пластичности ортотропного металла с изотропным упрочнением // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций: Сб. трудов XIV Международной научно-технической конференции. СПб., 2008. С. 130–139.
25. **Бердичевский Е.Г., Мельников Б.Е., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А., Семенов С.Г.** Экспериментальное изучение деформирования металла с ортотропной анизотропией // Научно-технические ведомости. СПбГПУ. 2010. № 1(95). С. 193–198.
26. **Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А.** Вязкопластические свойства хромоникелевой стали при возрастающих и постоянных нагрузках: Часть 1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование, 2012. № 2(147), Т. 2. С. 151–160.
27. **Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А.** Об изменении коэффициента поперечной вязкопластической деформации. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2012. № 4(159). С. 85–92.

REFERENCES

1. **Gorokhov M.Yu., Melnikov B.Ye., Semenov A.S.** *TS/klicheskaya nestabilnost pri raschetakh bolshikh uprugoplasticheskikh deformatsiy. Nauchno-tehnicheskkiye vedomosti SPbGPU.* 2003. № 3(33). S. 129. (rus.)
2. **Greshnov V.M.** Model vyazkoplasticheskogo tela s uchetom istorii nagruzheniya. *Izv. RAN. MTT.* 2005. №2. S.117–125. (rus.)
3. **Peleshko V.A** K postroyeniyu opredelyayushchikh sootnosheniy vyazkouprugosti i polzuchesti pri nestatsionarnykh i slozhnykh nagruzheniyakh. *Izv. RAN. MTT.* 2006. №3. S.144–165. (rus.)
4. **Khokhlov A.V.** Opredelyayushcheye sootnosheniye dlya reologicheskikh protsessov: svoystva teoreticheskikh krivykh polzuchesti i modelirovaniye zatukhaniya pamyati. *Izv. RAN. MTT.* 2007. №2. S.147–165. (rus.)
5. **Bondar V.S.** Varianty teorii neuprugosti. *Izv. RAN. MTT.* 2011. №1. S. 90–95. (rus.)

6. **Melnikov B.Ye., Semenov A.S., Semenov S.G.** Многомоделный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние. *Труды ТсНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2010. № 53. С. 85–92. (rus.)
7. **Bogatyrev I.S., Ilyushin A.A., Lenskiy V.S., Panferov V.M.** Mashina SN dlya issledovaniya plasticheskogo deformatsionirovaniya metallov pri slozhnom nagruzhnenii. *Inzhenernyy zhurnal*, 1961. №2. С. 150–163. (rus.)
8. **Tolokonnikov O.L.** O vliyaniy gidrostaticheskogo davleniya na konechnoye formoizmeneniye neszhimayemogo materiala. *Obshchiye zadachi i metody issledovaniya plastichnosti i vyazkoprugosti materialov i konstruktsiy: Sbornik AN SSSR*. Uralskiy nauchnyy tsentr, 1986. С. 110–115. (rus.)
9. **Giginyak F.F., Shkodzinskiy O.K., Fedorov R.K., Storchak M.V., Bashta V.V.** Avtomatizirovannyi stend dlya ispytaniy konstruktsionnykh materialov v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya. *Problemy prochnosti*. 1991. №10. С. 70–74. (rus.)
10. **Yagn Yu.I., Izotov I.N., Mityukov A.G.** Ustanovka dlya ispytaniy materialov pri obyemnom napryazhennom sostoyanii. *Zavodskaya laboratoriya*, 1973. №1. С. 150–163. (rus.)
11. **Pavlov P.A., Izotov I.N., Kuznetsov N.P., Mityukov A.G., A.N.Simanenok.** Ustanovka dlya ispytaniy materialov pri obyemnom napryazhennom sostoyanii. *Problemy prochnosti*, 1986, №2. С. 104–107. (rus.)
12. **Shakhovskiy G.P., Gonikberg M.G.** Ventil tochnoy regulirovki. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1966. №1. С. 218. (rus.)
13. **Bridzhmen P.** Fizika vysokikh davleniy. *ONTI NKTP SSSR*. M., L., 1935. 402 s. (rus.)
14. **Melnikov B.Ye., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A.** Ispytaniye trubchatykh obraztsov v usloviyakh koltsevoogo rastyazheniya. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2007. № 5. С. 77–79. (rus.)
15. **Izotov I.N., Kuznetsov N.P., Melnikov B.Ye., Mityukov A.G.** Uprugoplasticheskoye povedeniye stalnykh trubchatykh obraztsov pri slozhnom trekhosnom nagruzhnenii. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2003. № 3. С. 114. (rus.)
16. **Prandtl L.** Spanngugverteilung in plastischen Körper, *Verhandl. d. IJnt. Congr. Fürtech Mechanik*. 1924. (rus.)
17. **Prager V.** Vliyaniye deformatsii na usloviye plastichnosti vyazko–plasticheskikh tel. *Teoriya plastichnosti: Sb. statey*. M., 1948. С. 291–301. (rus.)
18. **Ilyushin A.A.** O svyazi mezhdru napryazheniyami i malymi deformatsiyami v mekhanike sploshnykh sred. *PMM*. 1954. T. XVIII, Vip. 6. С. 641–666. (rus.)
19. **Khill R.** Matematicheskaya teoriya plastichnosti. M.: GITTL, 1956. 407 s. (rus.)
20. **Kuzkin A.Yu., Melnikov B.Ye., Mityukov A.G., Popov V.A.** Ob ispolzovanii gipotezy «yedinoy» krivoy pri issledovanii neustoychivosti plasticheskogo deformatsionirovaniya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2006. № 48, T. 1. С. 85–88. (rus.)
21. **Zhukov A.M.** Nekotoryye osobennosti povedeniya metallov pri uprugo–plasticheskom deformatsionirovanii. *Voprosy teorii plastichnosti*. M.: AN SSSR, 1961. С. 30–57. (rus.)
22. **Frederking R.M., Saydbottom O.M.** Eksperimentalnaya proverka teorii plastichnosti anizotropnykh metallov. *Trudy AOIM*. 1971. С. 14–21. (rus.)
22. **Dillamor I.L., Dzh. Kheyzel, Uotson T.V., Kheden P.** Eksperimentalnoye izucheniye mekhanicheskoy anizotropii nekotorykh obshche-upotrebitelnykh metallov: Sb. perevodov. *Mekhanika*, 1972. №5. С. 134–147. (rus.)
23. **Kuzkin A.Yu., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A.** Eksperimentalnaya proverka teorii plastichnosti ortotropnogo metalla s izotropnym uprochneniyyem. *Problemy resursa i bezopasnoy ekspluatatsii materialov i konstruktsiy: Sb. trudov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. SPb., 2008. С. 130–139. (rus.)
24. **Berdichevskiy Ye.G., Melnikov B.Ye., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A., Semenov S.G.** Eksperimentalnoye izucheniye deformatsionirovaniya metalla s ortotropnoy anizotropiyyey. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 1(95). С. 193–198. (rus.)
25. **Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Yu., Popov V.A.** Vyazkoprasticheskkiye svoystva khromonikel'evoy stali pri vozrastayushchikh i postoyannykh nagruzhkakh. Chast 1. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. Ser.: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 2 (147), Vol. 2. С. 151–160. (rus.)
26. **Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Yu., Popov V.A.** Ob izmenenii koeffitsiyenta poperechnoy vyazkoprasticheskoy deformatsii. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. Ser.: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 4(159). С. 85–92. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЗЬКИН Андрей Юрьевич — кандидат технических наук доцент кафедры «КГМ и ТМ» Санкт-Петербургского государственного горного института имени Г.В. Плеханова; 199026, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2, Россия; e-mail: kuskinay@bk.ru

ЛАТЫШЕВ Дмитрий Викторович — заведующий лабораторией кафедры строительных конструкций НовГУ им. Ярослава Мудрого; В.Новгород, ул. Великая д.9/3, кв.1; Russia; e-mail:drag@list.ru

ПЕТРОВ Михаил Юрьевич — старший преподаватель кафедры строительных конструкций НовГУ им. Ярослава Мудрого; В.Новгород, ул. К.Маркса, д. 13, кв. 29; Russia; e-mail:michael_petrov@isn.ru

ПОПОВ Владимир Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры художественной и пластической обработки материалов НовГУ им. Ярослава Мудрого; Великий Новгород, ул. Черняховского д.60, кв.16; Russia; e-mail: pva-pva-pva@yandex.ru

AUTHORS

KUZKIN Andrey Yu. — St. Petersburg state mining institute im. G.V.Plekhanova; 199026, Saint Petersburg, Vasilyevskiy is island, 21- I line, 2, Russia; e-mail: kuzkinay@bk.ru

LATYSHEV Dmitriy V. — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University; V. Novgorod, ul Great d.9/3, kv.1; Russia; e mail:drag@list.ru

PETROV Mikhail Yu. — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University; V.Novgorod, ul K. Marksa, d. 13, kv. 29; Russia; e mail:michael_petrov@lisn.ru

ПОПОВ Vladimir A. — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, V. Novgorod, ul Chernyakhovskogo of d. 60, kv. 16; Russia; e-mail: pva-pva-pva@yandex.ru