

На правах рукописи

**Попов Владимир Алексеевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗОТРОПНОГО И  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛОВ**

Специальность 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена на кафедре «Сопротивление материалов» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Мельников Борис Евгеньевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
Васильев Виталий Захарович,  
Петербургский государственный университет путей  
сообщения;  
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
Лахов Николай Александрович,  
ГНЦ Центральный научно-исследовательский институт  
имени академика А.Н.Крылова,

Ведущая организация - Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМашРАН)

Защита состоится 14 ноября 2007 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.08 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, 2-й учебный корпус, ауд.265

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.229.08 к.ф-м.н., доцент

Воробьева Т.В.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность проблемы.** В технике широко распространены конструкции, материал которых работает в условиях преобладающего действия растягивающих напряжений. Известно, что при таком нагружении пластичного металла разрушению может предшествовать образование и развитие местной деформации, подобной шейке при осевом растяжении. Условие возникновения локальных деформаций, сформулированное в зависимости от истории нагружения, а также принятой модели материала, называют критерием потери устойчивости пластического деформирования.

Изучение предельных напряженно-деформированных состояний, обусловленных потерей устойчивости деформирования, является важной технической задачей. Исследование этой проблемы, разработка соответствующих критериев могут служить для достоверной оценки предельной несущей способности элементов конструкции наряду с критериями разрушения. Кроме того, критерии потери устойчивости используются при разработке технологических процессов обработки металлов давлением для определения максимальной равномерной деформации до наступления неустойчивости.

Неустойчивость пластического деформирования изотропных материалов при плоском напряженном состоянии изучена сравнительно подробно. В литературе приводятся многочисленные критерии, выведенные авторами на основе различных подходов. Экспериментальные исследования, выполненные с целью проверки названных критериев, зачастую приводят к противоречивым результатам. Заниженные значения предельных равномерных деформаций по сравнению с прогнозами теории являются характерным итогом большинства экспериментов. Работ, как теоретических, так и экспериментальных, посвященных неустойчивости деформирования анизотропных материалов, значительно меньше. Вопросы, связанные с несущей способностью магистральных газо- и нефтепроводов, вызвали в настоящее время повышенный интерес к этой проблеме.

**Цель работы.** Экспериментальное изучение потери устойчивости пластического деформирования изотропных и начально анизотропных трубчатых

образцов, испытываемых в условиях пропорционального нагружения при плоском напряженном состоянии в диапазоне от осевого до кольцевого растяжений.

**Направление и методы исследований.** В литературе обнаруживается явный недостаток результатов опытов, опровергающих или подтверждающих известные критерии, поэтому проведены экспериментальные исследования потери устойчивости пластического деформирования. Кроме того, применительно к начально анизотропному металлу и принятой схеме нагружения модифицирован и экспериментально проверен критерий Изотова. В связи с использованием в работе теории пластичности Хилла для анизотропных металлов произведена также ее экспериментальная проверка.

**Достоверность** полученных результатов основывается на использовании фундаментальных положений теории пластичности, сопоставлении полученных соотношений с известными из литературы, тщательном и строгом проведении эксперимента на поверенном оборудовании и подтверждается соответствием с результатами опытов, выполненных другими авторами.

**Научная новизна.** 1) Получены новые экспериментальные результаты возникновения неустойчивости пластического деформирования изотропного и определенного класса анизотропных материалов.

2) Предложен и экспериментально проверен модифицированный критерий потери устойчивости пластического деформирования ортотропного и трансверсально изотропного материалов.

3) Произведена в условиях пропорционального нагружения экспериментальная проверка теории пластичности Хилла для трансверсально изотропного материала.

**Практическая значимость.** Результаты выполненной работы нашли применение при разработке технологических процессов глубокой вытяжки металлов, а именно: в ОАО НПП «Старт», В.Новгород, при разработке технологических процессов изготовления изделий методами листовой штамповки; в ПКТИ (Проектно-конструкторский и технологический институт трубопровод-

ной арматуры) АТОМАРМПРОЕКТ ОАО «Корпорация СПЛАВ» при разработке технологического процесса глубокой вытяжки детали «колпачок».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на региональной научно-технической конференции с международным участием «Кораблестроительное образование и наука-2003», Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2003; на XI научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», Санкт-Петербург, апрель 2006 г.; на научных семинарах кафедры «Художественная и пластическая обработка материалов» НовГУ, май 2007 г. и кафедры сопротивления материалов СПбГПУ, сентябрь 2007 г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано двенадцать печатных работ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержит 140 страниц текста, 50 рисунков, 7 таблиц. Приложение составляет 35 страниц, список литературы включает 103 наименования.

### Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы, намечаются главные направления исследований.

**В первой главе** дается краткий обзор работ, посвященных потере устойчивости пластического деформирования изотропных листа и цилиндрической оболочки, деформируемых в условиях плоского напряженного состояния. (Дорн, Купер, Ленкфорд, Сейбл, Закс, Любан). По аналогии с одноосным растяжением точка, соответствующая потере устойчивости, определяется на диаграмме  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  («интенсивность «истинных» напряжений–интенсивность «истинных» деформаций») по критической величине подкасательной (рисунок 1).

Критерии даются авторами в форме зависимости  $z_{крит}$  от отношения напряжений в момент потери устойчивости

$$z_{крит} = z(\alpha), \quad (1)$$

где  $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$  (или  $\sigma_\theta / \sigma_z$ ).

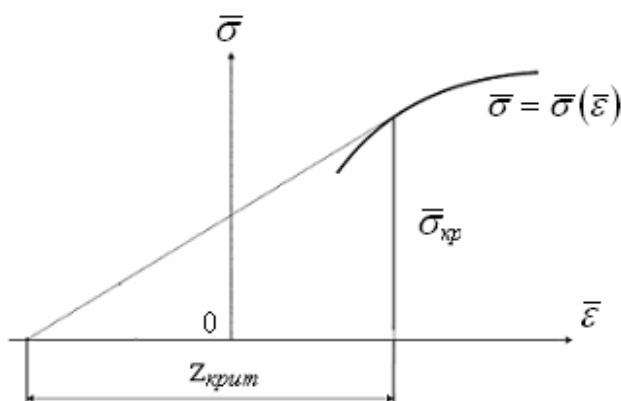


Рисунок 1 – Подкасательная к кривой  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  в точке потери устойчивости

Известны два основных подхода к изучению проблемы потери устойчивости пластического деформирования. В подходе Хилла устойчивое деформирование связывается с единственностью решения краевой задачи. Момент потери устойчивости определяется как точка ветвления напряженного и деформированного состояний.

Согласно второму подходу, основанному на постулате Друкера, пластическое деформирование будет устойчивым, если работа добавочных напряжений на вызванных ими приращениях деформаций за цикл нагружения и разгрузки положительна. Оба подхода послужили основой частных критериев.

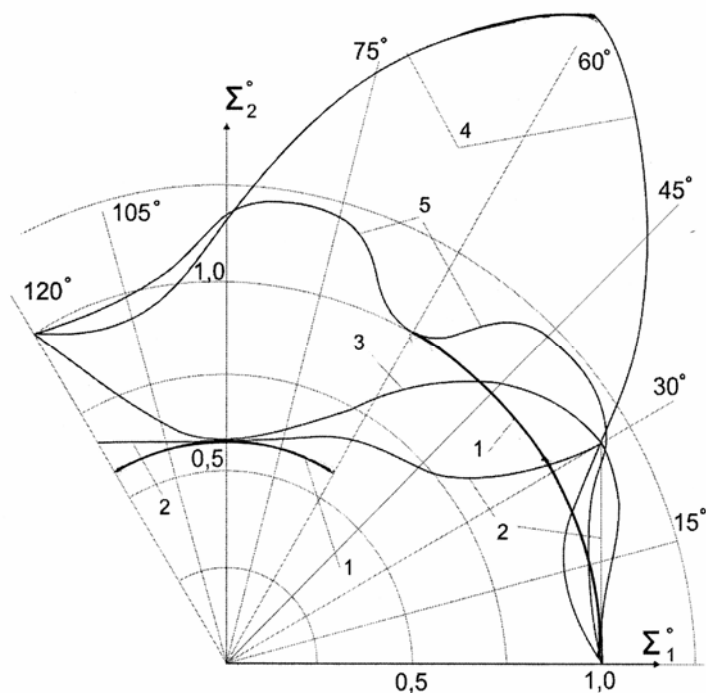
На рисунке 2 значения критической подкасательной, подсчитанные по упомянутым частным критериям, отложены по лучам, определяющим вид напряженного состояния и исходящим из начала безразмерных координат двумерного пространства напряжений Прагера-Ильюшина:

$$\Sigma_1^0 = \Sigma_1 / \bar{\sigma}_{kp}, \quad \Sigma_2^0 = \Sigma_2 / \bar{\sigma}_{kp}, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}_{kp}$  - интенсивность напряжений в момент потери устойчивости при одноосном растяжении.

Работ по исследованию устойчивости пластического деформирования начально анизотропных материалов немного. Вопросами устойчивости элементов конструкций в условиях пластического деформирования занимались А.А.Ильюшин и В.Г.Зубчанинов. Н.Н.Малинин изучал устойчивость пластиче-

ского деформирования ортотропных листов и цилиндрических оболочек. Дюби с сотрудниками исследовал деформирование анизотропной трубы из материала, обладающего изотропно-трансляционным упрочнением.



1- Дорн; 2 – Ленкфорд-Сейбл - Меллор; 3 – Свифт – Марциняк, Сторакерс (при  $\beta = \tau_{\theta z} / \sigma_z = 0$ ), Изотов (при  $\varphi(d\bar{\epsilon}, \bar{\sigma}) = 0$ ); 4- Купер; 5 – Хилье  
Рисунок 2 – Кривые  $z_{крит} = z(\psi)$ , построенные по различным критериям

**Во второй главе** дается описание оборудования, использованного при проведении экспериментов. Основная установка позволяет деформировать образцы по схеме  $p_e - p_n - P$  в диапазоне от осевого до кольцевого растяжений при различных уровнях шаровой части тензора напряжений. Нагрузки создаются давлениями жидкости: внутреннее  $p_e$ , наружное  $p_n$ , давление  $p_0$  под плунжером, передающим на образец осевую силу. Таким образом, в создании осевой силы  $P$  участвуют все три давления. Испытательная камера – двухслойный сосуд – рассчитана на максимальное рабочее давление 1000 МПа. Источники давления – ручные плунжерные насосы с диаметром плунжера 4 мм. Установка позволяет осуществить нагружение по любой траектории для соответствующей программы последовательного ступенчатого изменения давлений. Кроме того, при проведении опытов использовались специально разработанный гидравлический преобразователь, который позволяет осуществить

пропорциональное (бесступенчатое) нагружение при  $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z = 0,5$ , и устройство для деформирования образца вне камеры (на воздухе) в условиях кольцевого растяжения. Таким образом, были реализованы четыре пропорциональных (бесступенчатых) пути нагружения  $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z = 0; 0,5; 2,0; \infty$ .

Эксперименты проводились на тонкостенных трубчатых образцах ( $d_{cp} = 26,4$  мм,  $t = 0,3$  мм), нарезанных из цельнотянутых труб из стали X18H10T-ВД.

**В третьей главе** формулируются цель и программа опытов, описывается проведение эксперимента, приводится методика построения теоретических кривых  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon)$  для проверки теории пластичности Хилла ортотропных материалов. При составлении программы опытов, при разработке методики создания начальной анизотропии и обработке результатов эксперимента использовались двумерные пространства напряжений ( $\Sigma_1 = \sigma_z - \sigma_\theta / 2 - \sigma_r / 2$ ;  $\Sigma_2 = \sqrt{3}(\sigma_\theta - \sigma_r) / 2$ ) и деформаций ( $E_1 = \varepsilon_z$ ;  $E_2 = (\varepsilon_z + 2\varepsilon_\theta) / \sqrt{3}$ ) Прагера-Ильюшина. Пропорциональный путь нагружения в плоскости  $\Sigma_1, \Sigma_2$  задается углом вида напряженного состояния  $tg \psi = \Sigma_2 / \Sigma_1$ , где  $\psi$  отсчитывается от оси  $\Sigma_1$ .

Поскольку при изучении устойчивости пластического деформирования анизотропных материалов использовалась теория пластичности Хилла для ортотропных металлов, была осуществлена экспериментальная проверка правильности ее использования.

**В четвертой главе** дается критерий потери устойчивости Изотова, модифицированный применительно к ортотропному материалу с изотропным упрочнением. При выводе использовалась теория пластичности Хилла для ортотропного металла. Критерий в форме выражения критической подкасательной к графику функции  $\bar{\sigma}_{экс} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_{экс})$  имеет вид:

$$\frac{1}{z_{кр}} = \frac{1}{\bar{\sigma}_{экс}} \frac{d\bar{\sigma}_{экс}}{d\bar{\varepsilon}_{экс}} = \frac{9}{4(F_0 + G_0 + H_0)^2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \psi [(G_0 - H_0) \cos \psi + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \psi (4F_0 + G_0 + H_0)]^2 + \cos \psi [(G_0 + H_0) \cos \psi + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_0 - H_0) \sin \psi]^2 \right\} \quad (3)$$



где  $F_0, G_0, H_0$  - начальные параметры анизотропии;  $\psi$  - угол между  $\bar{\sigma}_{\text{экв}}$  и  $\Sigma_1$ .

Для трансверсально изотропного выражение для критической подкасательной будет таким:

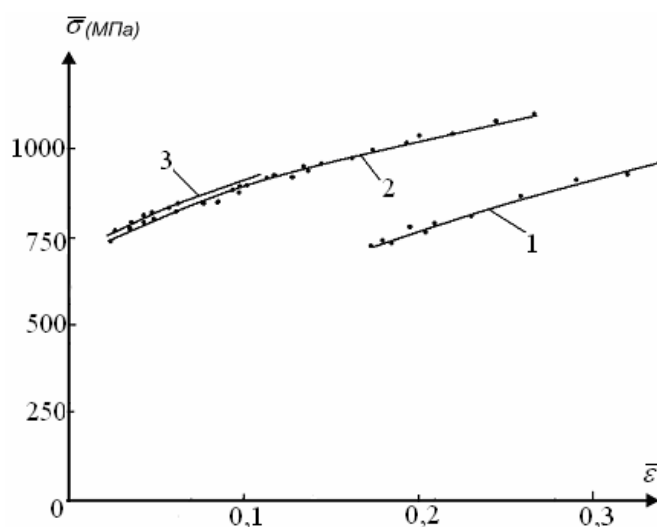
$$\frac{1}{z_{кр}} = \frac{1}{\bar{\sigma}_{\text{экв}}} \frac{d\bar{\sigma}_{\text{экв}}}{d\bar{\varepsilon}_{\text{экв}}} = \frac{9}{(F_0 + 2G_0)^2} \left[ \frac{1}{3\sqrt{3}} (2F_0 + G_0)^2 \sin^3 \psi + G_0^2 \cos^3 \psi \right]. \quad (4)$$

**В пятой главе** представлены и анализируются результаты опытов. Описывается методика создания начальной анизотропии. Приводятся результаты проверки теории пластичности Хилла. Рассматривается влияние начальной анизотропии и вида напряженного состояния на пластическое деформирование и потерю устойчивости. При деформировании образца по лучу  $\psi = 30^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z = 0,5$ ) средний диаметр не изменяется, а внутреннее  $p_e$  и внешнее  $p_n$  давления связаны постоянным соотношением. Это обстоятельство позволило создавать начальную анизотропию образцов, нагружая их по этому лучу до требуемого уровня остаточной деформации в условиях однопараметрического нагружения. Остаточная деформация образцов из начального материала при нагружении по лучу  $\psi = 30^\circ$  составляла  $\bar{\varepsilon} = 0,149$ . Проверка теории Хилла производилась путем построения теоретических кривых для лучей  $\psi = 30^\circ$ , ( $\bar{\varepsilon} \geq 0,17$ ),  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ . При этом использовались диаграммы деформирования  $Z = Z(\varepsilon_{zs})$ ,  $T = T(\varepsilon_{\theta s})$ , построенные по результатам испытаний анизотропных образцов на осевое ( $\psi = 0^\circ$ ) и кольцевое ( $\psi = 120^\circ$ ) растяжения.

Кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  («эквивалентное напряжение–эквивалентная деформация»), построенные по теории Хилла с нанесенными на них экспериментальными точками, представлены на рисунке 3. Можно утверждать, что для рассматриваемого вида анизотропии (трансверсальная изотропия) предсказания теории Хилла хорошо согласуются с результатами эксперимента.

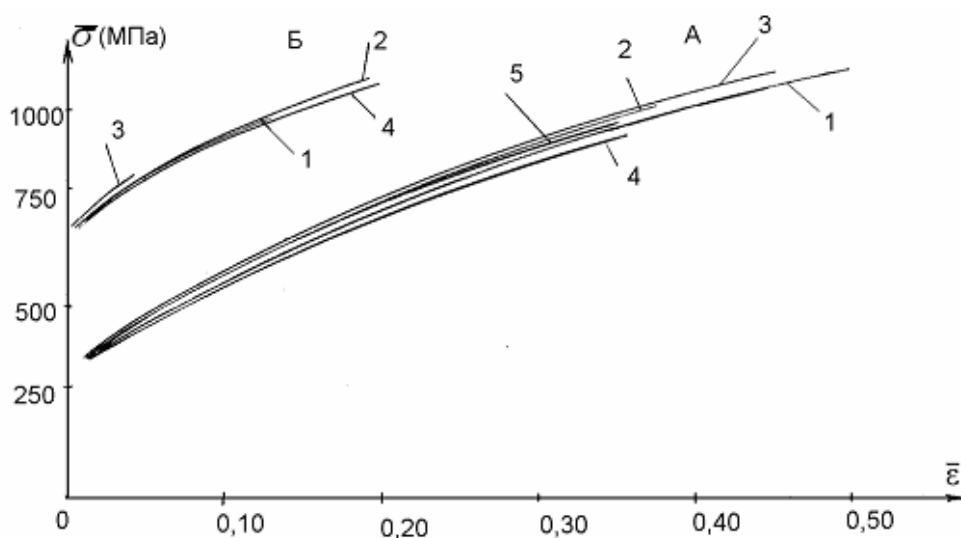
Кривые деформирования  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ , построенные по результатам испытаний образцов из изотропного и предварительно деформированного материалов, представлены совмещенными порознь на рисунке 4. Для построения каждой кривой использовались результаты испытаний нескольких образцов. Мак-

симальное расхождение кривых по напряжениям у исходного материала (при  $\bar{\varepsilon}=0,4\div 0,50$ ) составляет 7%, у предварительно деформированного (при  $\bar{\varepsilon}=0,15\div 0,20$ ) – 1,8%.



-- теория Хилла; • - экспериментальные точки  
 1-  $\psi=30^\circ$  ( $\bar{\varepsilon} \geq 0,17$ ); 2 -  $\psi=60^\circ$ ; 3 -  $\psi=90^\circ$ ;

Рисунок 3 – Теоретические кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  и экспериментальные точки

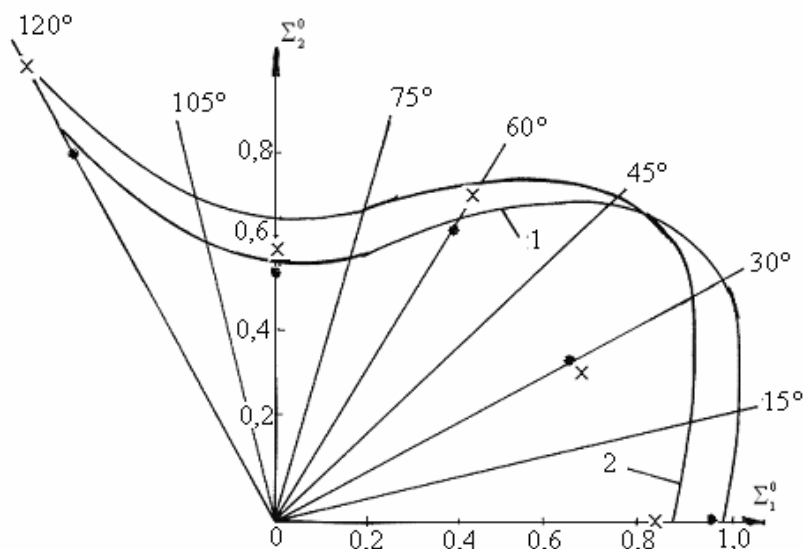


1-  $\psi=0^\circ$ ; 2 -  $\psi=30^\circ$ ; 3 -  $\psi=60^\circ$ ; 4 -  $\psi=90^\circ$ , 5-  $\psi=120^\circ$  (исходный материал);  
 1-  $\psi=0^\circ$ ; 2-  $\psi=60^\circ$ ; 3-  $\psi=90^\circ$ ; 4-  $\psi=120^\circ$  (предварительно деформированный)

Рисунок 4 – Кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ , построенные по результатам испытаний исходных (А) и предварительно деформированных (Б) трубчатых образцов

Неустойчивость пластического деформирования может рассматриваться как форма предельного состояния образца. Геометрические места точек исчерпания несущей способности (разрушения или потери устойчивости равномер-

ного деформирования) образуют в пространствах напряжений и деформаций предельные поверхности, ограничивающие области однородного напряженно-деформированного состояния. Поскольку умеренные значения первого инварианта тензора напряжений не оказывают влияния на пластическое деформирование металлов, удобно вместо предельных поверхностей изучать предельные кривые, представляющие собой линии пересечения названных поверхностей с девиаторной плоскостью. Ниже эти кривые представлены в двумерных пространствах напряжений  $\Sigma_1, \Sigma_2$  и деформаций  $E_1, E_2$ . Значения критических подкасательных для исходного и начально-анизотропного материалов на рисунке 5 отложены по соответствующим лучам в безразмерных координатах  $\Sigma_1^0, \Sigma_2^0$ .



- 1 – исходный материал; • – экспериментальные значения;
- 2 – предварительно деформированный материал ( $R=0,805$ );
- x – экспериментальные значения

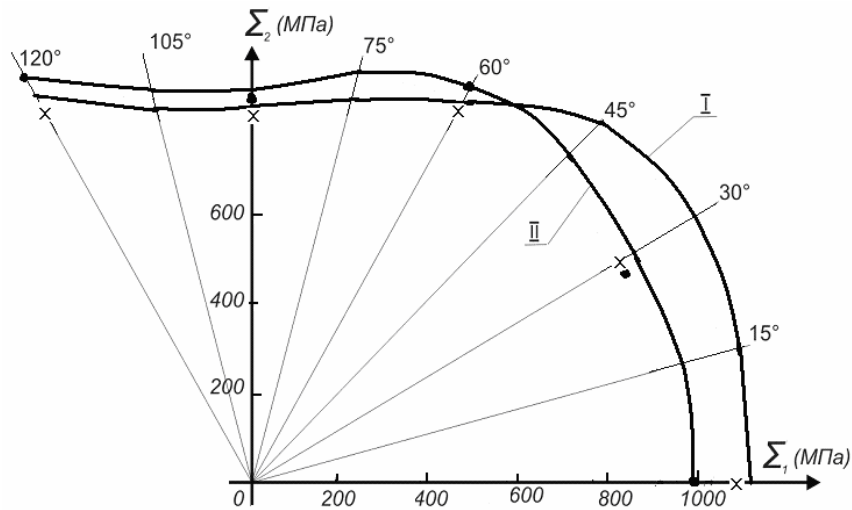
Рисунок 5–Теоретические и экспериментальные значения критической подкасательной

Для определения экспериментальных значений критической подкасательной  $z_{крит}^0$  и сопоставления их с прогнозом теории по результатам испытаний образцов для каждого луча строились кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$ , которые в области, прилегающей к точке потери устойчивости, аппроксимировались степенной зависимостью вида  $\bar{\sigma} = A\bar{\epsilon}^n$ .

Экспериментальные значения  $z_{крит}^{\circ}$  определялись следующим образом:

$$z_{крит}^{\circ} = \left( \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\sigma}/d\bar{\varepsilon}} \right)_{крит} = \frac{A\bar{\varepsilon}^n}{An\bar{\varepsilon}^{n-1}} = \frac{\bar{\varepsilon}}{n}, \quad (5)$$

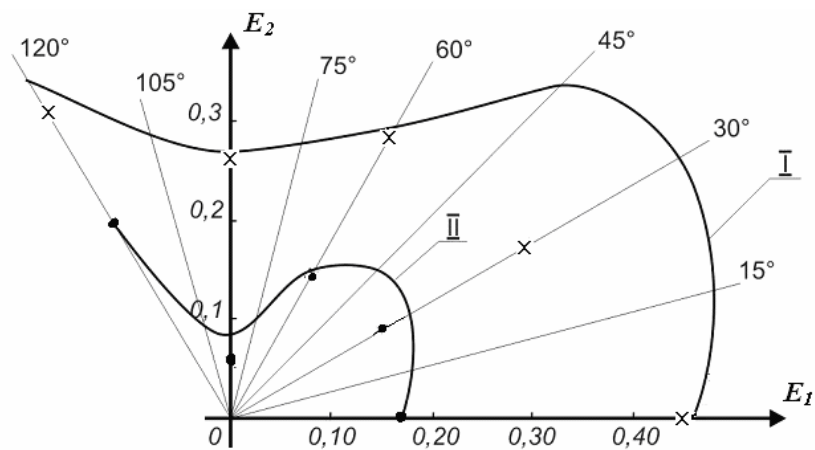
здесь:  $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{max}$  - максимальное значение интенсивности предельной равномерной деформации при испытании по данному лучу партии образцов. На луче  $\psi = 30^{\circ}$  разрушение происходит без локализации деформации. Поэтому  $z_{крит}^{\circ}$ , а также предельные значения  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{\varepsilon}_{max}$  устанавливались на момент разрушения образца. Сравнение результатов эксперимента с предсказаниями модифицированного для анизотропного материала критерия по значениям  $z_{крит}$  хотя и является общепринятым, но не слишком показательным. Целесообразно сравнивать предельные напряжения и деформации. На рисунках 6 и 7 в пространствах напряжений и деформаций соответственно представлены теоретические кривые, отвечающие исчерпанию несущей способности образцов. Там же нанесены точки, изображающие экспериментальные предельные значения  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{\varepsilon}$ . По напряжениям обнаруживается удовлетворительное соответствие эксперимента и теории, за исключением луча  $\psi = 30^{\circ}$ , где для исходного материала расхождение составляет 17,8%. Что касается образцов с наведенной анизотропией, удовлетворительное совпадение имеет место на всех лучах. Сравнение по напряжениям все-таки недостаточно наглядно; расхождения с теорией по деформациям могут быть весьма значительными, однако это почти не отразится на положении экспериментальных точек относительно предельных кривых вследствие пологости диаграмм  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ . Результаты, представленные на рисунке 7, где сравниваются предельные значения интенсивности деформаций, весьма показательны. У исходного материала существенное расхождение с теорией имеет место только на луче  $\psi = 30^{\circ}$ . У предварительно деформированного материала различия между результатами эксперимента и теорией составляют 15% и 30% на лучах  $\psi = 30^{\circ}$  и  $\psi = 90^{\circ}$ , соответственно. На остальных лучах расхождения не превышают 7%.



I, × – теоретическая кривая и экспериментальные точки для изотропного материала,

II, • – то же для предварительно деформированного материала

Рисунок 6 – Предельные кривые в пространстве напряжений



I, × – теоретическая кривая и экспериментальные точки для изотропного материала,

II, • – то же для предварительно деформированного материала

Рисунок 7 – Предельные кривые в пространстве деформаций

Таким образом, можно заключить: на тех лучах, где у испытуемых образцов не выявлялась локальная деформация, имеют место наибольшие расхождения между данными опытов и теорией. Названным лучам отвечают состояния плоской деформации (при  $\psi = 30^\circ$ ,  $\varepsilon_\theta = 0$ ; при  $\psi = 90^\circ$ ,  $\varepsilon_z = 0$ ). При плоской деформации и путях нагружения, близких к ней, предельные нагрузки, деформации и напряжения определяются разрушением, а не потерей устойчивости деформирования. Выше (рисунок 4) отмечались весьма незначительные расхождения кривых  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  в испытаниях при различных видах напряженного состояния

образцов из исходного и предварительно деформированного материалов. В этой связи уместно сравнить теоретические предельные деформации, подсчитанные с применением «индивидуальных» уравнений для каждого луча и обобщенного уравнения, в качестве которого использовать диаграмму осевого или кольцевого растяжений. Сравнение для исходного материала обнаружило максимальное расхождение по деформациям в 12% на луче  $\psi = 120^\circ$  (кольцевое растяжение). На остальных лучах различие не превосходило 5,5%. Для предварительно деформированного материала расхождение в значениях предельных деформаций на всех лучах (кроме  $\psi = 90^\circ$ ) не превышало 3%, на луче  $\psi = 90^\circ$  (состояние плоской деформации) названное различие составило 43%.

Таким образом, определение предельных характеристик в момент устойчивости пластического деформирования с использованием «обобщенного» уравнения и критерия в форме  $z_{крит} = z(\alpha)$  или  $z_{крит} = z(\psi)$  представляется не только оправданным, но и целесообразным.

### **Основные выводы и результаты**

1) Экспериментально исследована потеря устойчивости пластического деформирования трубчатых образцов с наведенной анизотропией в условиях преобладающего действия растягивающих напряжений. Предварительно исследована потеря устойчивости деформирования образцов из изотропного материала.

2) Разработана методика, сконструированы и изготовлены устройства, позволившие наряду с опытами в основной установке осуществить деформирование тонкостенных трубчатых образцов при пропорциональном изменении напряжений. Названные испытания выполнены в четырех из пяти исследованных путей нагружения в диапазоне от осевого до кольцевого растяжений. При этом были подтверждены результаты опытов, проводившихся на подобного рода установках при пошаговом изменении параметров нагрузки.

3) Установлено хорошее совпадение данных опытов и результатов расчетов по модифицированному критерию потери устойчивости деформирования,

основанного на постулате Друкера с использованием теории пластичности Хилла для анизотропных материалов.

4) В связи с использованием в работе теории пластичности Хилла для ортотропного металла была произведена ее экспериментальная проверка. Эксперименты обнаружили хорошее согласие с названной теорией для частного случая анизотропии – трансверсальной изотропии.

**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

1 Критерий неустойчивости пластического течения ортотропного жестко-пластического материала в условиях объемного напряженного состояния /И.Н.Изотов, А.Г.Митюков, А.Ю.Кузькин, В.А.Попов; НовГУ.–В.Новгород, 2002.- 2 с.: ил.-Рус.- Деп. в ВИНТИ 09.12.2002, N 2135-B2002

2 Установка для испытаний тонкостенных трубчатых образцов в условиях объёмного напряжённого состояния/ И.Н.Изотов, А.Г.Митюков, В.А.Попов; НовГУ–В.Новгород, 2003.–10 с.: ил.- Рус.-Деп. в ВИНТИ 08.05.03. №887-B2003

3 Исследование влияния предварительной пластической деформации на кривые деформирования хромоникелевой стали/ Е.Г.Бердичевский, Д.А. Масленков, А.А.Митюков, В.А.Попов; НовГУ – В.Новгород, 2007.–9 с.: ил. – Рус. - Деп. в ВИНТИ 19.06.07 №656-B2007

4 Попов В.А. Установка для испытания тонкостенных трубчатых образцов в условиях объемного напряженного состояния/ В.А.Попов, А.Г.Митюков// Материалы региональной научно-технической конференции «Кораблестроительное образование и наука-2003».–СПб.: СПбГМТУ, 2003. – С.423-428

5 Melnikov B.E. Criterion of loss of stability of plastic deformation of transversely isotropic pipe with thin walls/ B.E.Melnikov, A.G.Mityukov, V.A.Popov// New Approachs to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering – St. Petersburg, Russia, 2004. - v.8 - P.101-105.

6 Кузькин А.Ю. Экспериментальная проверка теории пластичности Хилла/ А.Ю.Кузькин, Б.Е.Мельников, А.Г.Митюков, В.А.Попов //Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов: Сборник трудов XII международной

научно-технической конференции.– СПб.: ГОУВПО «Санкт-Петербургский ГУНИПТ», 2006.- С.114-120.

7 Попов В.А. Критерий потери устойчивости пластического деформирования тонкостенной трубы, основанный на постулате Друкера/ В.А.Попов, А.Г.Митюков// Материалы региональной научно-технической конференции «Кораблестроительное образование и наука– 2003-СПб.: СПбГМТУ, 2003. – Т.1.- С.371-377

8 Изотов И.Н. Критерий потери устойчивости пластического деформирования тонкостенной трубы из ортотропного жестко-пластического материала в условиях объемного напряженного состояния./ И.Н.Изотов, Б.Е.Мельников, А.Г.Митюков, В.А.Попов// Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды VI Международной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – С.226-231.

9 Кузькин А.Ю. Экспериментальное изучение локализации пластической деформации изотропного и предварительно деформированного металлов./ А.Ю.Кузькин, Б.Е.Мельников, А.Г.Митюков, В.А.Попов// Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2006. - №5. – С.55 – 64.

10 Кузькин А.Ю. Об использовании гипотезы «единой» кривой при исследовании неустойчивости пластического деформирования/ А.Ю.Кузькин, Б.Е.Мельников, А.Г.Митюков, В.А.Попов// Научно-технические ведомости СПбГТУ. Том 1.– СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006 - №6. – С.85-89.

11 Мельников Б.Е. Испытание трубчатых образцов в условиях кольцевого растяжения/ Б.Е.Мельников, А.А.Митюков, А.Г.Митюков, В.А.Попов// Гидротехническое строительство. – СПбГПУ, 2007 - №5. - С.77-78

12 Кузькин А.Ю. Приспособление для испытания трубчатых образцов в условиях кольцевого растяжения / А.Ю.Кузькин, Б.Е.Мельников, А.Г.Митюков, В.А.Попов// Труды СПбГТУ. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. - №502. – С.88-90