

Аннотация. В статье приводятся результаты испытаний до разрушения образцов алюминиевых сплавов АМг6, АМг6М различной формы, среди которых одноосные образцы, трубчатые образцы на кручение, круглые мембраны, предназначенные для гидровыпучивания, тонкие подрезанные пластины, плоские образцы с отверстиями и круглые сплошные образцы с кольцевыми выточками разного радиуса надреза. Обсуждается влияние объемности напряженного состояния, рассчитанного методом математического моделирования процессов нагружения образцов каждого типа, на предельные деформации.

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, несущая способность, истинная диаграмма свойств, устойчивость пластического деформирования, объемность напряженного состояния.*

Статья посвящена влиянию объемности напряженного состояния на предельные прочностные и деформационные характеристики алюминиевых сплавов. Основу исследования составляют результаты испытаний гладких образцов, по которым определяется истинная диаграмма свойств материала, и результаты испытаний образцов, при нагружении которых реализуется пусть и неоднородное, но трехмерное напряженное состояние. Математическому моделированию и сравнению с опытными данными подвергнуты процессы кручения трубчатых образцов, процессы осесимметричного гидровыпучивания тонких круглых мембран, а также растяжения тонких подрезанных пластин, в средней части которых реализуется условие плоской деформации. Для них характерна относительно слабая концентрация напряжений. Общая картина дополнена результатами анализа предельных состояний образцов с высокой концентрацией напряжений: толстых и тонких пластин с отверстиями, круглых сплошных образцов с кольцевыми выточками разного радиуса надреза. Статья написана в продолжение обсуждения вопросов нормирования прочности и ресурса конструкций ракетно-космической техники, затронутых в процессе работы VI школы-семинара, проведенной 9-10 апреля 2013 года в г. Москве на базе Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) [1].

Для моделирования механического поведения материала использована теория течения с нелинейным изотропным упрочнением. В алгоритме построения истинной диаграммы свойств до момента достижения временного сопротивления σ^B экспериментально измеренные силы (номинальные напряжения σ^H) и соответствующие им удлинения Δl пересчитываются в истинное напряжение σ и эквивалентную логарифмическую деформацию ε из условия упругого изменения объема $\sigma^H = \sigma \exp(\sigma/3/K - \varepsilon)$ [2]. В уравнении σ – истинное напряжение; $K = E/3/(1-2\nu)$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона материала; $\varepsilon = \ln(\lambda)$ – логарифмическая деформация; $\lambda = l/l_0$ – кратность удлинения; l_0, l – начальная и текущая длина. За точкой достижение максимальной нагрузки напряженное состояние в образце уже неоднородно, и поэтому диаграмма свойств определяется итерационно. Оставшийся диапазон экспериментальных удлинений разбивается на интервалы. Начало первого интервала сопоставляется с последней известной точкой $(\sigma_k, \varepsilon_k)$ истинной диаграммы свойств. Для определения следующей точки, соответствующей концу первого интервала, решается последовательность задач с линейным продолжением диаграммы свойств. Угол наклона E_k итерационно подбирается так, чтобы расчетное значение номинального напряжения и экспериментальное значение в конце интервала совпали. Затем в

расчетной области определяется максимальное значение интенсивности логарифмических деформаций ε_{\max} . Значение напряжения σ_{\max} , соответствующего ей, будет равно $\sigma_k + E_k (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_k)$. Пара значений $(\sigma_{\max}, \varepsilon_{\max})$ определяет новую точку истинной диаграммы свойств, которая соответствует началу следующего интервала удлинения. Далее процесс повторяется до исчерпания данных опыта.

Результаты испытаний образцов, в которых реализуются состояния с различными соотношениями главных компонент напряжений, составляют основу построения критериев разрушения, ориентированных на современные расчетные методы. В каждом из испытаний проводится измерение зависимости нагрузки от параметра изменения геометрии, с которой затем сравнивается расчетная кривая. Начало разрушения (нарушения сплошности) определяется по отклонению расчетных значений от экспериментальных данных. Метод можно уточнить, если при испытании контролировать материал в наиболее опасных местах другими средствами, например, применять диагностическую аппаратуру неразрушающего контроля сплошности или современные средства измерения удлинений [3]. Подбор критериев разрушения или определение предельных характеристик материала проводится на основе анализа напряженного состояния для назначенной нагрузки.

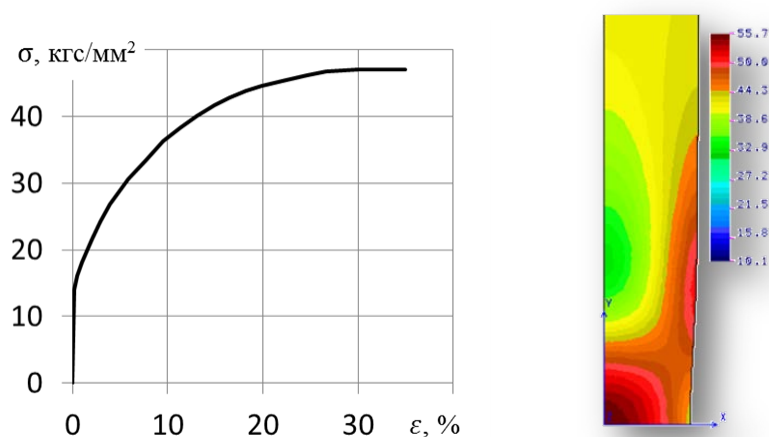


Рисунок 1. Истинная диаграмма сплава АМгб и карта максимального главного напряжения

Растяжение круглого сплошного образца. Опыты по растяжению круглых образцов являются базовыми при определении истинной диаграммы свойств материала (см. рисунок 1). При обработке экспериментальных данных предполагается однородность полей деформаций до момента образования местного сужения. Использование этой гипотезы и применение итерационного алгоритма идентификации свойств после точки достижения максимума нагрузки позволяют уверенно воспроизвести результаты испытаний методами математического моделирования. Следует отметить, что неоднородность напряженного состояния в образце всё-таки существует, и существует с самого начала процесса нагружения. Она обусловлена галтелями захватных фланцев. Неоднородность невелика, но именно она является причиной будущей потери устойчивости, поскольку с увеличением нагрузки происходит ее развитие и перемещение к центру образца. Для алюминиевого сплава АМгб, истинная диаграмма свойств которого показана на рисунке 1, величина горизонтальной асимптоты равна $47,1 \text{ кгс/мм}^2$. В момент разрушения одноосное напряженное состояние преобразуется в центре на оси образца в трехосное (56 кгс/мм^2 ; $8,6 \text{ кгс/мм}^2$; $8,6 \text{ кгс/мм}^2$). Интенсивность деформаций изменяется по радиусу от 39 % на оси вращения до 34 % на внешней поверхности выточки. Образование «шейки» приводит к появлению зон разгрузки с обеих сторон от плоскости ее расположения. К моменту разрушения осевое напряжение в них снижается до значения $\sim 32 \text{ кгс/мм}^2$, и появляются одинаковые сжимающие кольцевые и радиальные напряжения $\sim 12 \text{ кгс/мм}^2$.

Кручение. Испытания трубчатых образцов на кручение являются вторым по распространенности способом получения экспериментальной информации для построения истинной диаграммы свойств конструкционных материалов. Их изготовление требует достаточно большого количества материала, определенной точности изготовления и соблюдения требований к геометрии, предотвращающих потерю устойчивости при больших углах закручивания. Достоинством таких испытаний является отсутствие изменения объема и, как следствие, простой способ пересчета экспериментальной зависимости крутящего момента от угла в истинную диаграмму свойств. Как показывают испытания, истинные диаграммы свойств сплава АМгб, полученные моделированием опытов на кручение и растяжение, при качественном совпадении характера поведения количественно отличаются в пределах 10 % (см. рисунок 2).

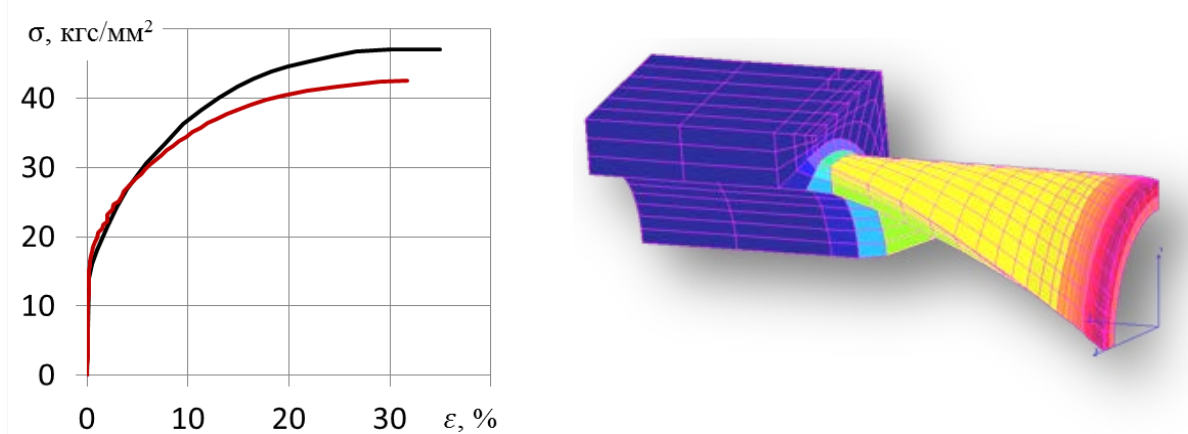


Рисунок 2. Истинные диаграммы сплава АМгб при кручении и растяжении

Предельные пластические деформации, оцененные в предположении идеальности начальной геометрии образца на кручение, отличаются также незначительно (39 % при растяжении, 37 % при кручении). Однако, как показывают расчетные исследования, незначительное утонение внешнего диаметра в центральном сечении образца не оказывает влияния на зависимость крутящего момента от угла, тогда как местные деформации могут существенно увеличиться. Такая нечувствительность к локализации деформаций является недостатком опытов на кручение.

Гидровыпучивание круглых мембран. Одним из способов создания равновеликого двухосного плосконапряженного состояния является гидровыпучивание защемленных по внешнему диаметру тонких круглых мембран (см. рисунок 3).

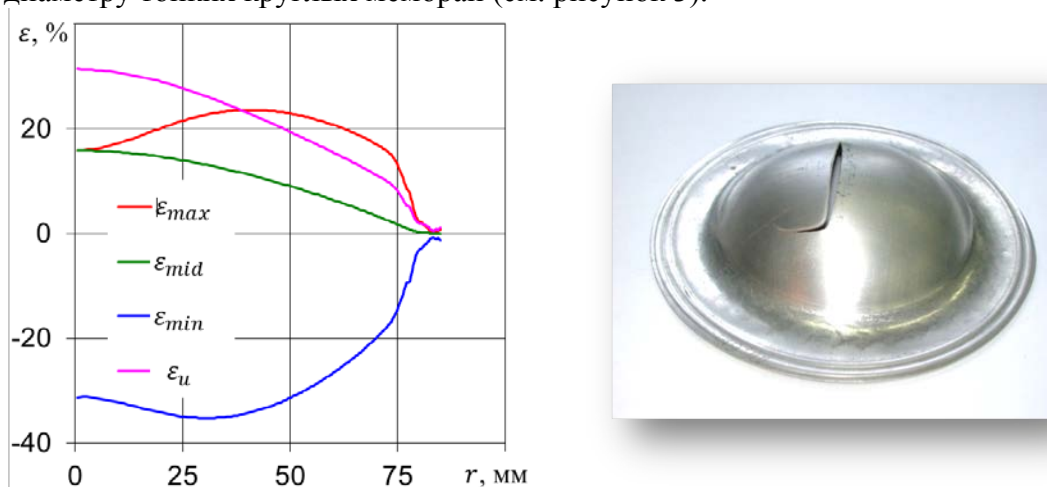


Рисунок 3. Расчетные деформации перед разрушением

Во избежание разрушения около оправки ее изготавливают с заданным радиусом закругления. Напряженное состояние изначально неодинаково по радиусу, однако всегда можно добиться того, что максимальные интенсивности напряжений и логарифмических дефор-

маций будут иметь место в центре купола пластины. Расчетное значение критического давления пластины диаметром 170 мм и толщиной 2 мм, опирающейся на оправку с радиусом 10 мм, равно 141 атм., что несколько больше экспериментальных значений (134 атм. - для первого опыта, 138 атм. – для второго). Прогиб центра при экспериментальном давлении 134 атм. равен 37 мм. Максимальное относительное удлинение на внешней поверхности, измеренное инструментальным микроскопом по предварительно нанесенным меткам, составляет 14 и 15 %. Эти значения соответствуют интенсивности логарифмических деформаций $\varepsilon_u = 2\varepsilon_1 = -\varepsilon_h$ 26,2 % и 28 %. Расчетная интенсивность логарифмических деформаций ε_u на внешней поверхности равна 31,4 %, на внутренней – 28,7 %.

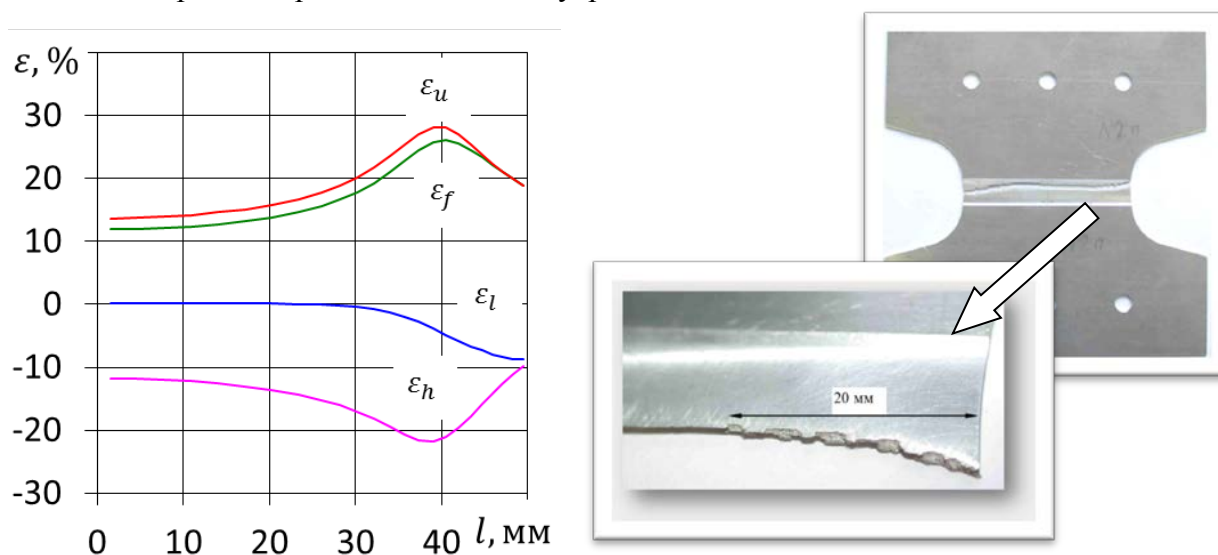


Рисунок 4. Расчетные деформации перед разрушением

Растяжение подрезанных пластин. Тонкие подрезанные пластины (см. рисунок 4) обладают тем свойством, что в центральной их части можно добиться состояния плоской деформации. Широкие фланцы образца сдерживают поперечное сжатие (логарифмическую деформацию ε_l) в более тонкой центральной области. Тензодатчики для измерения удлинений вдоль действия силы (логарифмической деформации ε_f) наклеивают обычно во фрезерованной области на оси симметрии пластины. Математическое моделирование испытаний пластин из сплава АМг6М толщиной 1,5 мм (во фрезерованной части 1 мм) подтверждает, что модуль логарифмической деформации по толщине ε_h совпадает с ε_f . Однако в момент, предшествующий разрушению, в непосредственной близости к вырезу существует область, простирающаяся на 20 мм, в которой интенсивность логарифмических деформаций ε_u достигает 28 % и превышает интенсивность логарифмических деформаций в центре. Толщина образца локально падает до 0,8 мм. Характерный пилообразный характер разрушения свидетельствует о начале нарушения сплошности и о выборе направления дальнейшего окончательного разлома именно в этой зоне. При такой картине распределения деформаций трудно предполагать, что разрушение начинается с плоскости симметрии образца.

Растяжение пластин с отверстиями. В большинстве случаев создание объемного напряженного состояния выполняется на образцах с концентрацией напряжений. К ним относятся пластины с отверстиями и круглые образцы с кольцевой выточкой. Трудности обработки результатов таких испытаний обусловлены градиентностью напряженного состояния, затрудняющей точное определение места и момента начала нарушения сплошности. Оставаясь на позиции механики сплошной среды, можно утверждать, что на несущую способность образцов с концентраторами (отношение максимальной силы к начальной площади нетто-сечения образца) будет оказывать влияние жесткость материала вокруг отверстия или вы-

точки. Так, например, для двух пластин одинакового нетто-сечения максимальная нагрузка будет больше для пластины с центральным отверстием по сравнению с нагрузкой для пластины с двумя внешними выточками такого же радиуса. Для круглых образцов существенную роль играет еще и наличие кольцевой жесткости, поддерживающей нетто-диаметр в выточке. При одинаковой площади нетто-сечения несущая способность круглых образцов будет больше несущей способности пластин с отверстиями.

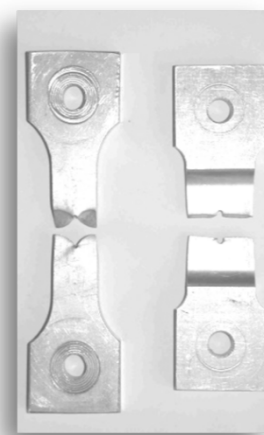
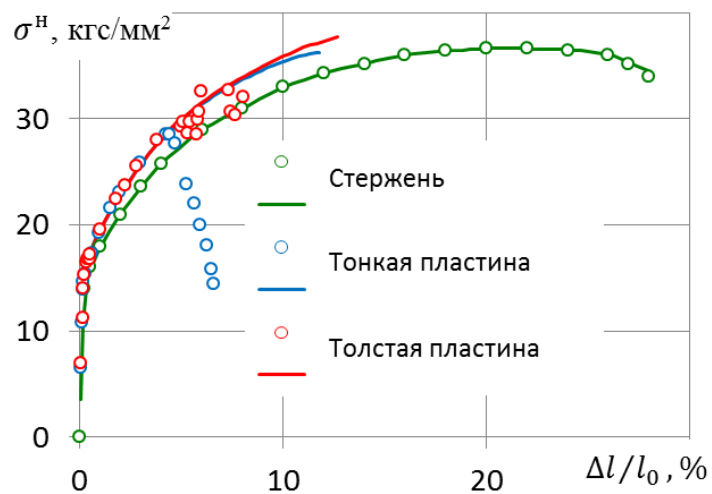


Рисунок 5. Максимальные нагрузки для пластин с отверстиями

Рассмотрим результаты опытов по растяжению двух пластин из сплава АМг6, одна из которых (тонкая) имеет ширину рабочей зоны 30 мм, длину 32 мм, толщину 2 мм, диаметр отверстия $\varnothing 3$ мм, а другая (толстая) – ширину рабочей зоны 20 мм, длину 50 мм, толщину 10 мм, диаметр отверстия $\varnothing 2$ мм. Результаты математического моделирования процесса растяжения пластин и их вид после разрушения показаны на рисунке 5. В экспериментах при жестком нагружении динамометром замерены силы, а удлинения – датчиком с базой 25 мм, охватывающим область отверстия. Хаотичный разброс экспериментальных точек зависимости для толстой пластины связан с частичным срывом захвата. Как для толстой, так и для тонкой пластины разрушающие номинальные напряжения меньше временного сопротивления материала. Начальные участки расчетных и экспериментальных зависимостей совпадают достаточно точно. Для тонкой пластины четко наблюдается момент нарушения сплошности при удлинении базы датчика 4,3 %. За момент нарушения сплошности в толстой пластине принято достижение удлинения базы датчика 7,3 %. Перед разрушением максимумы главных напряжений располагаются на глубине примерно половины диаметра отверстия. Максимальная интенсивность логарифмических деформаций в центре на поверхности отверстия для толстой пластины равна 28 % (в точке действия максимального главного напряжения – 17 %), для тонкой – 24 % (в точке действия максимального главного напряжения – 19 %).

Растяжение круглых образцов с кольцевой выточкой. Испытания круглых образцов с кольцевой выточкой позволяют получить экспериментальную информацию о деформировании и разрушении материала при трехосном напряженном состоянии. Экстремальные значения главных напряжений, интенсивностей напряжений и деформаций при малых нагрузках и упругом деформировании достигаются на внешней поверхности выточки. С появлением пластических деформаций максимумы значений главных напряжений смещаются внутрь образца так, что их координаты не совпадают друг с другом. В большинстве случаев максимум интенсивности напряжений и деформаций остается на поверхности и только для больших радиусов выточки и при существенном изменении геометрии, вызванной большими деформациями, они могут перемещаться к центру нетто-сечения. Эксперименты по растяжению образцов из алюминиевого сплава АМг6 с кольцевыми выточками (см. рисунок 6) подтверждают предположение о большей несущей способности круглых образцов по сравнению с

несущей способностью пластин с отверстиями (рисунок 5). Определение критических параметров при неравномерном напряженном состоянии затруднительно. Наиболее логично считать моментом нарушения сплошности образца с острой выточкой радиусом 0,5 мм достижение удлинения базы датчика 4,77%. Этот момент характеризуется максимальным главным напряжением 62,1 кгс/мм², промежуточным 32,6 кгс/мм², минимальным 21,4 кгс/мм² в точках с координатами 3,71 мм, 3,53 мм, 3,21 мм, соответственно, при интенсивности логарифмических деформаций 33,9% на поверхности. В точке максимума первого главного напряжения величины меньших напряжений по отношению к нему относятся как 1:0,51:0,22, а интенсивность деформаций равна 16,1%. Максимум расчетной нагрузки образца с плавной выточкой радиусом 2,5 мм приходится на удлинение базы датчика 12,0%, интенсивность логарифмических деформаций достигает 34,2%. В этот момент экстремум первого главного напряжения равен 64 кгс/мм² и располагается в точке с координатой 1,36 мм. Остальные напряжения в ней определяются из пропорции 1:0,35:0,33, а интенсивность логарифмических деформаций составляет 14,7%. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к быстрому росту осевого напряжения в центре нетто-сечения, не изменяя его на поверхности выточки. К моменту разделения образца на части при последнем экспериментальном удлинении 18%, соотношение между напряжениями в центральной точке стремится к 1:0,47:0,47, максимальное главное напряжение достигает 86 кгс/мм², а интенсивность деформаций на свободной поверхности – 54%.

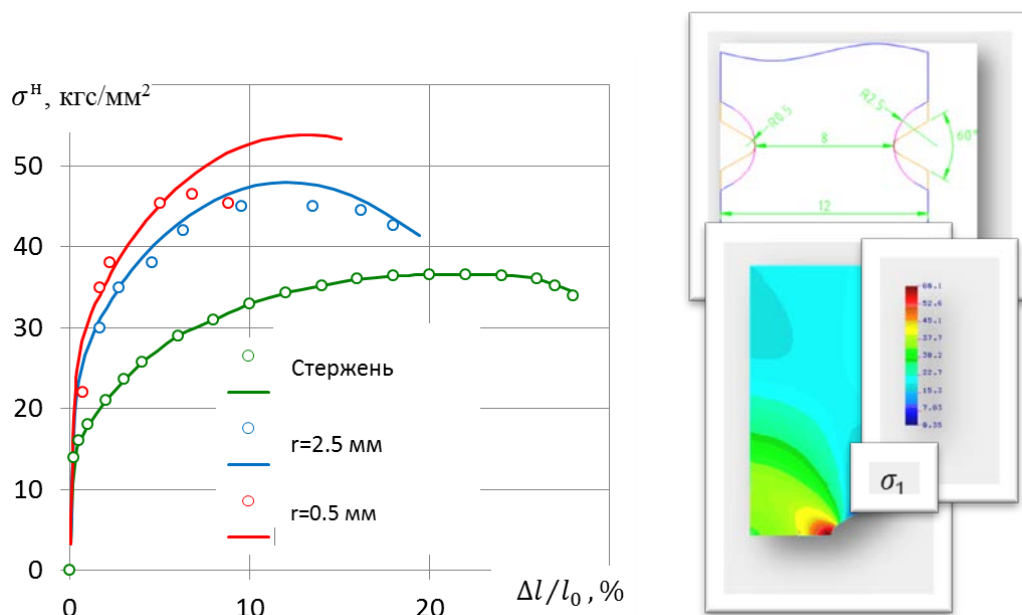


Рисунок 6. Несущая способность образцов с выточками

Обобщение результатов расчетно-экспериментального исследования предельных деформаций, при которых происходит нарушение сплошности материала и разделение на части опытных образцов с различным соотношением компонент напряжений, представлено на рисунке 7. Для семи различных испытаний в предполагаемые моменты нарушения сплошности на графике по левой оси ординат отложено максимальное главное напряжение σ_{\max} в объеме образца и максимальная интенсивность напряжений σ_u . По правой оси ординат – интенсивность логарифмических деформаций ε_u , соответствующая интенсивности напряжений σ_u , и интенсивность логарифмических деформаций ε_{\max} в точке максимального главного напряжения σ_{\max} . По оси абсцисс отложен коэффициент объемности $1 + \sigma_2/\sigma_1 + \sigma_2/\sigma_1$ в точке действия максимального главного напряжения σ_{\max} . Сравнение интенсивностей логарифмических деформаций ε_u при кручении трубки, при растяжении стержня и при растяжении об-

разца с острой выточкой не показывает явной зависимости предельной деформации от вида напряженного состояния.

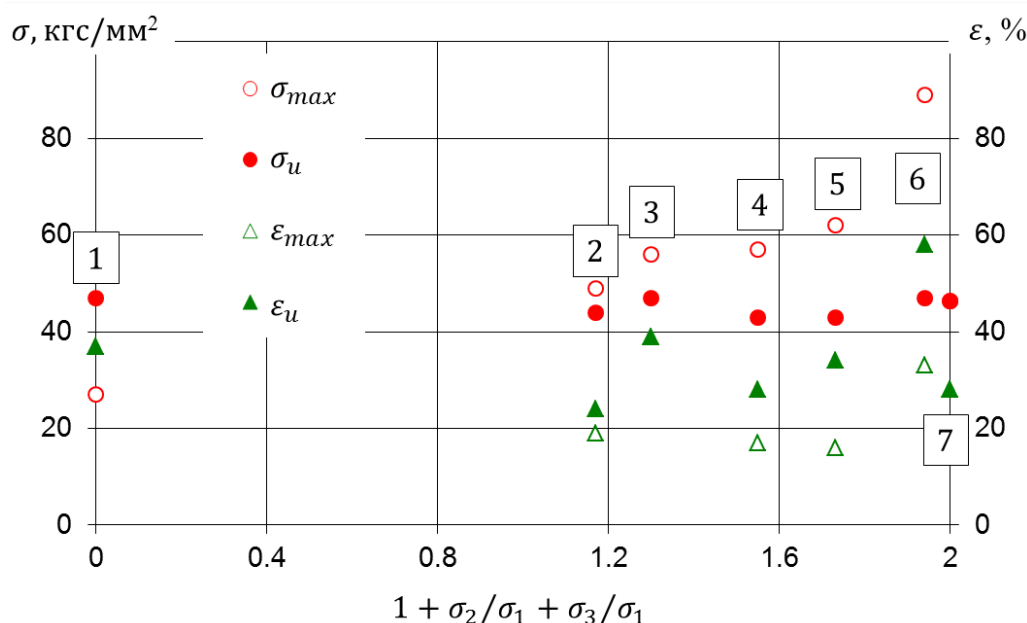


Рисунок 7. Влияние объемности: 1 – кручение трубки; 2 – тонкая пластина с отверстием; 3 – растяжение стержня; 4 – толстая пластина с отверстием; 5 – образец с острой выточкой; 6 – образец с плавной выточкой; 7 – мембрана при гидровыпучивании

Возможно, это связано с изначально другими свойствами собственно листового материала. Отметим, что при кручении трубки, при растяжении стержня и при гидровыпучивании мембран положение максимального главного напряжения совпадает с положением максимальной интенсивности логарифмических деформаций (интенсивности напряжений) и местом начала нарушения сплошности. Во всех остальных случаях сопоставить область начала разрушения с каким-либо параметром напряженного состояния не представляется возможным в силу высокой градиентности его характеристик. Проведение экспериментальных исследований с использованием средств измерения поверхностных деформаций VIC-2D, VIC-3D и магнитно-резонансных томографов для изучения состояния материала внутри может существенно повысить информативность опытов и поможет продвинуться в понимании состояния предразрушения конструкционных материалов.

Литература

1. Владимиров С.А., Горохов В.Б., Трефилов С.И., Абашев Д.Р., Корнев Д.В., Кондратенко М.А. Прочность и ресурс жидкостных ракетных двигателей. Современные проблемы термовязкопластичности в прикладных задачах анализа конструкций высоких параметров. Труды VI школы-семинара. – М. Ун-т машиностроения, 2013, с. 41–58.
2. Владимиров С.А., Агальцов В.И., Дегтярев В.П. Математическое моделирование механических свойств металлов и сплавов при больших деформациях. – Изв. РАН. МТТ, 2007, № 1, с. 145–159.
3. Владимиров С.А., Трефилов С.И., Апетьян В.Э., Астрединов В.М. Измерение деформаций тонкого паяного шва средствами обработки изображений пакета LabView и бесконтактной измерительной системы VIC-2D. Космонавтика и ракетостроение, № 3 (72), 2013.