

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՑԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՍՍԼՄԱՐԱՆ**

ՀԱԿՈՒԹՅԱՆ ՆԱՐԵ ԳԱՐԻԿՎ

**ԼԱՐՎԱԾԱԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՇԵՐՏԱԶԵՎ
ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ ԾՈՒՄԱՄԲ ՊԱՏՐԱՍՏՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ**

Ե.02.01 - <<Մեքենագիտություն>> մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2021

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

АКОПЯН НАРЕ ГАРИКОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ФОРМЫ
ПОЛОС ПЛАСТИЧЕСКИМ ИЗГИБОМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.02.01 - “Машиноведение”

ЕРЕВАН 2021

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի գիտական խորհրդի կողմից

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Գ.Լ. Պետրոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Մ.Գ. Ստակյան
տ.գ.թ. Ն.Բ. Զաքարյան

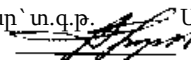
Առաջատար կազմակերպություն՝ Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2021թ. դեկտեմբերի 27-ին, ժ.13:00-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ԲՈՒԿ-ի <<Մեքենաշինություն և մեքենագիտություն>> 034 մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Հասցե՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2021թ-ի նոյեմբերի << 16 >>-ին

034 Մասնագիտական խորհրդի քարտուղար՝ տ.գ.թ.  Մ.Գ. Հարությունյան

Тема диссертации утверждена Ученым советом Национального политехнического университета Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. Г.Л. Петросян

Официальные оппоненты: д.т.н. М.Г. Стакян
к.т.н. Н.Б. Закарян

Ведущая организация: Ереванский государственный университет архитектуры и строительства

Защита состоится 27-ого декабря 2021г. в 13:00 ч. на заседании Специализированного совета ВАК 034 – "Машиностроение и Машиноведение", действующего при Национальном политехническом университете Армении по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА

Автореферат разослан << 16 >> ноября 2021г.

Ученый секретарь Специализированного совета 034

к.т.н.  М.Г. Арутюнян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В аспекте интенсивного развития машиностроения все большее значение приобретают процессы обработки металлов давлением, среди которых наиболее распространенным является процесс изгиба. Деформации, вызванные изгибом, на начальном этапе являются упругими, затем они переходят в упругопластические и могут достигать таких величин, что материал практически во всем сечении заготовки находится в пластическом состоянии. Пластический изгиб сопровождается значительным изменением исходных размеров поперечного сечения изделия. Известны ранние исследования, проведенные в этой области и представляющие большой интерес, которые получили развитие в работах Г.А. Смирнова - Аляева, Н.Н. Малинина, П. Хилла, В.В. Соколовского и Е.А. Попова.

При изгибе балок важен учет их габаритных размеров: если отношение высоты h прямоугольного сечения к длине l пролета элемента удовлетворяет условию $h / l > 1/5$, то они не работают в качестве балки, в результате чего меняются условия расчета. При больших деформациях имеют место изменение положения нейтрального слоя балки, который смещается в зону сжатия, а также изменение напряженно-деформированного состояния из-за взаимовлияния продольных нитей. Такие балки называют листами и полосами с прямоугольным сечением. Следует отметить, что в работах Е.А. Попова решена задача изгиба широкой полосы, которая сводится к решению задачи изгиба листа Н.Н. Малинина.

Что касается задачи изгиба листа из спеченных (пористых) материалов, то она была выполнена Г.Л. Петросяном и А.Л. Левоняном на основе уравнений теории течения пористых материалов (ТТПМ), которые учитывают историю деформации листа. В этом случае решение проблемы изгиба листа из пористых материалов является достаточно сложным. Следует отметить, что проблемам изгиба с учетом пористости материала посвящено мало исследований. Исходя из изложенного, можно утверждать, что исследования в этой области являются актуальными.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование напряженно-деформированного состояния деталей машин формы широких полос из сплошных и пористых материалов при их изготовлении пластически чистым изгибом,

направленное на получение изделий с заданными физико-механическими свойствами.

Исходя из поставленной цели, в диссертации намечены и решены следующие задачи:

1. Анализ экспериментальных данных модулей упругости в зависимости от пористости медных и стальных спеченных материалов, определение и сравнение прогибов спеченной стальной шарнирноопертой балки с различной начальной пористостью под воздействием равномерно распределенной нагрузки.
2. Выявление и анализ особенностей построения пластических предельных контуров сплошных и спеченных материалов с различной начальной пористостью в линейных и плоских задачах пластического деформирования.
3. Разработка инженерных методов определения компонентов напряженного состояния изгиба полосы из пористых материалов с использованием известного аналитического метода определения безразмерных величин напряжений пластического изгиба в условиях плоской деформации полосы и уравнений деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТППМ).
4. Разработка алгоритма в программной среде MathCad для определения компонентов напряженного состояния в полосах, пределов текучести спеченных материалов с различной пористостью, величин напряжений и измененных значений начальной пористости материала.
5. Моделирование процесса изгиба полосы в среде ABAQUS, определение компонентов напряженно-деформированного состояния и их сравнение с результатами теоретического анализа.

Методы исследования

1. Исследования проводились на основе ДТППМ с использованием методики определения безразмерных величин напряжений полосы сплошного материала, позволяющей по их результатам рассчитать реальные значения напряжений для спеченного материала с различной начальной пористостью.

2. Численные расчеты проводились в программной среде MathCAD, а моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния процесса изгиба полосы - в среде ABAQUS.

Научная новизна работы. В процессе исследования получены результаты, отличающиеся существенной научной новизной:

1. Сравнительный анализ прогибов спеченной стальной балки при различных начальных пористостях под действием равномерно распределенной нагрузки. Установление особенностей предельного контура пластичности материала в случаях различных напряженных состояний и начальных пористостей материала.
2. Для исследования напряженно-деформированного состояния при пластическом изгибе спеченной полосы в условиях плоской деформации на основе уравнений ДТППМ разработаны аналитические инженерные методы: безразмерных величин напряжений, эквивалентного напряжения в пористых материалах, а также упрощенный метод определения окружных напряжений на опасных, с точки зрения разрушения полосы, внешних поверхностях.
3. Путем компьютерного моделирования в среде ABAQUS определены все компоненты напряженно-деформированного состояния в двух случаях чистого изгиба полос из упрочненного материала. Проведены численные исследования процессов возникновения первых пластических деформаций и достижения предельного состояния, данные которых сравнены с результатами, полученными аналитическими методами.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Полученные формулы для определения координат характерных точек предельной кривой, а также установленные на их основе предельные контурные кривые могут быть использованы как в научно-лабораторных, так и в производственных условиях.
2. Разработанные упрощенные первый и второй методы определения напряженного состояния при пластическом изгибе спеченной полосы позволяют определить основной параметр изменения начальной пористости материала во всем объеме полосы, а упрощенный третий метод дает возможность рассчитать прочность

в наиболее опасной точке полосы спеченного материала на наружной поверхности ее растянутой зоны.

3. Результаты моделирования в среде ABAQUS могут быть использованы для получения изделий с высокими механическими свойствами при проектировании технологических процессов изгиба спеченной полосы.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Выявление особенностей построения предельных контуров пластичности и анализ результатов в случае задач линейного и плоского пластического деформирования полосы при различных значениях пористости ее материала.
2. Разработанные три упрощенных метода исследования пластического изгиба полосы из спеченных материалов аналитическим методом с использованием безразмерных значений радиального и окружного напряжений для сплошных неупрочняемых материалов и уравнений ДТППМ.
3. Методика моделирования процесса изгиба полосы в среде ABAQUS и определения компонентов напряженного состояния с учетом упрочнения материала.

Апробация работы. Основные научные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на: ежегодных конференциях НПУА (Ереван, 2017, 2019 гг.); XXIV Международной научно-технической конференции «Машиностроение - технология XXI века» (Донецк, 2017 г.); семинарах кафедры «Механика и машиноведение» НПУА (Ереван, 2016 - 2019 гг.).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в восьми статьях и тезисах докладов, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, включающего 84 наименования. Основной объем работы составляет 99 страниц, включая 42 рисунка и 5 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации. Исследованы особенности определения напряжений и деформаций при пластическом изгибе балок с применением аналитического метода, а также случай чистого изгиба балок прямоугольного сечения, когда график растяжения материала имеет идеальную пластическую часть.

Проанализированы особенности изгиба листа и полосы. При этом показано, что в литературе процесс изгиба листа изучен наиболее полно (изделие, размер которого в направлении, перпендикулярном плоскости воздействия изгибающего момента, больше, чем толщина заготовки).

Во второй главе использованы экспериментальные данные модуля упругости $E_{\text{п}}$ в зависимости от пористости v , полученные для спеченного медного порошка, приведенные в книге М.Ю. Балышина, которые аппроксимируются линейной функцией

$$E_{\text{п}} = E_{\text{в}}(1 - 2,28v), \quad (1)$$

где $E_{\text{в}}$ - модуль упругости вещества пористого материала.

Показано, что данные для модуля упругости материала, рассчитанные по формуле С. Шима:

$$E_{\text{п}} = E_{\text{в}}(1 - v)^{2,6}, \quad (2)$$

достаточно близки к экспериментальным (1).

Прогибы спеченной стальной шарнирноопертой балки с различной начальной пористостью определялись под действием равномерно распределенной нагрузки q (рис. 1) с применением уравнения упругой линии балки:

$$y = \frac{q}{24E_{\text{п}}I_x}(2lz^3 - l^3z - z^4), \quad (3)$$

где I_x - момент инерции поперечного сечения балки.

Расчет прогибов производился в середине $z = l/2$ сплошных и спеченных стальных балок длиной $l = 6\text{ м}$ при: $q = 30\text{ кН/м}$, $I_x = 35 \cdot 10^{-6}\text{ м}^4$, $E_{\text{в}} = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$ с использованием формулы (2): при $v = 0 - f_0 = -72\text{ мм}$; при $v = 0,1 - f_1 = -95\text{ мм}$; при $v = 0,2 - f_2 = -128\text{ мм}$; при $v = 0,3 - f_3 = -180\text{ мм}$.

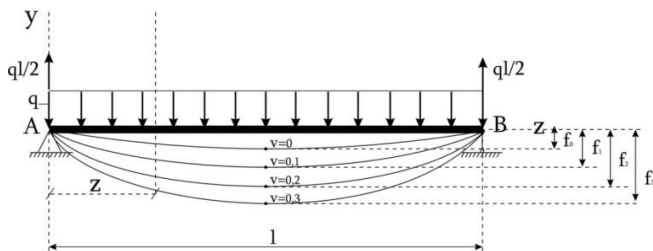


Рис. 1. Схема определения прогибов шарнирноопертой пористой балки

Показано, что при больших значениях пористости прогибы балок увеличиваются с большей интенсивностью.

Для расчета предела пластичности в различных случаях деформирования деталей машин из спеченных материалов при различных напряженных состояниях проведен анализ условий пластичности (УП) Мизеса: $\sigma_i = \sigma_T$ и Треска-Сен-Венана: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T$ ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$), где σ_i – интенсивность напряжений; σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения; σ_T – предел текучести материала. Предельная поверхность Мизеса изображена на рис.2а. На рис.2б шестиугольник abcdef соответствует УП Треска в случаях плоского напряженного состояния ($\sigma_2 = 0$), а эллиптическая предельная кривая – УП Мизеса:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_3^2 = \sigma_T^2. \quad (4)$$

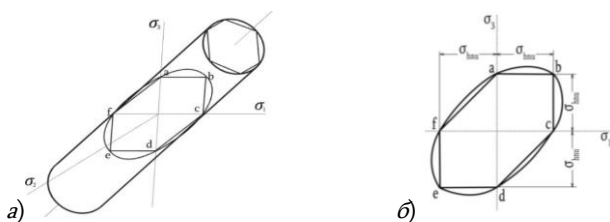


Рис. 2. Пластические предельные поверхности и кривые Мизеса (а) и Треска (б)

Для сплошных материалов Е.А. Поповым указаны координаты всех характерных точек эллипса и величин его полуосей (рис.3). Рассмотрены три напряженных состояния: а) четыре точки эллипса (линейное растяжение и сжатие), например: $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; б) две точки соответствуют случаю чистого сдвига: $\sigma_1 = -\sigma_3$, $\sigma_2 = 0$; в) четыре точки одновременно соответствуют не только случаю плоского напряженного

состояния, но и случаю состояния плоской деформации, например: $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_1/2, \sigma_3 = 0$.

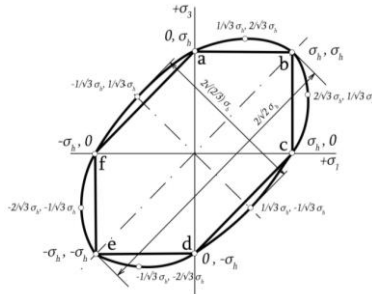


Рис. 3. Координаты характерных точек эллиптической предельной кривой

Для спеченных материалов используется следующее УП ТТПМ, предложенное Г.Л. Петросьяном:

$$\frac{1}{(1-v)^{n+0.5}} \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + v^m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \right)^{0.5} = \sigma_{T0}, \quad (5)$$

где $m = 1$, и $n = 0.25$ – параметры пористости материала; σ_{T0} – предел текучести вещества спеченного материала.

При начальных пористостях материала: 1) $v = 0,1$; 2) $v = 0,2$ и 3) $v = 0,3$, исследованы приведенные выше три напряженных состояния:

а) в случае одноосного напряженного состояния УП принимает вид: $\frac{1}{2} [2\sigma_1^2] + v^m \sigma_1^2 = ((1-v)^{n+0.5})^2 \sigma_h^2$. Последовательно преобразуя его, получим $\sigma_1 = ((1-v)^{n+0.5} / \sqrt{1+v^m}) \sigma_T$.

В случае различных пористостей материала напряжение σ_1 будет выражено пределом текучести σ_T : 1) $\sigma_1 = 0,880\sigma_T$; 2) $\sigma_1 = 0,769\sigma_T$; 3) $\sigma_1 = 0,671\sigma_T$;

б) в случае чистого сдвига ($\sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$) УП принимает вид: $3\sigma_1^2 + v^m \cdot 0 = ((1-v)^{n+0.5})^2 \sigma_h^2$, откуда $\sigma_1 = \frac{(1-v)^{n+0.5}}{\sqrt{3}} \sigma_T$.

В этом случае: 1) $\sigma_1 = 0,534\sigma_T$; 2) $\sigma_1 = 0,489\sigma_T$; 3) $\sigma_1 = 0,442\sigma_T$;

в) в случае двусосного растяжения ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_1/2, \sigma_3 = 0$) имеем $\frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_1^2}{4} + \frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_1^2 \right] + v^m \frac{9\sigma_1^2}{4} = ((1-v)^{n+0.5})^2 \sigma_T^2$, $\sigma_1 = \frac{2(1-v)^{n+0.5} \sigma_T}{\sqrt{3(1+3v^m)}}$.

Соответственно σ_1 и σ_2 имеют вид: 1) $\sigma_1 = 0,94\sigma_T, \sigma_2 = 0,47\sigma_T$; 2) $\sigma_1 = 0,77\sigma_T, \sigma_2 = 0,39\sigma_T$; 3) $\sigma_1 = 0,64\sigma_T, \sigma_2 = 0,32\sigma_T$.

Путем представления указанных выше значений в системе координат σ_1, σ_3 строятся графики УП для различных начальных

пористостей (рис. 4). Анализ графиков показывает, что в случае плоского напряженного состояния пористость материала оказывает существенное влияние на изменение как размера (уменьшается), так и формы (выпрямляется, переворачивается и надувается) графиков граничных УП для его различной начальной пористости.

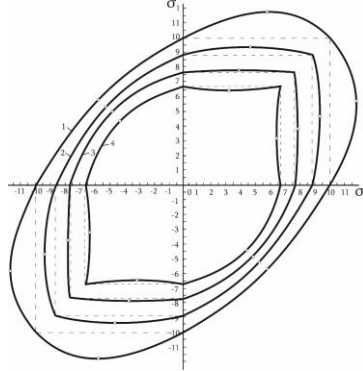


Рис. 4. Графики плоского напряженного состояния УП при:
 1 - $v = 0$; 2 - $v = 0,1$; 3 - $v = 0,2$; 4 - $v = 0,3$

В третьей главе проведено исследование напряженного состояния чистого пластического изгиба широкой полосы (рис.5) из спеченного материала в условиях плоской деформации ($\epsilon_z = 0$). Разработаны три упрощенных метода решения задач.

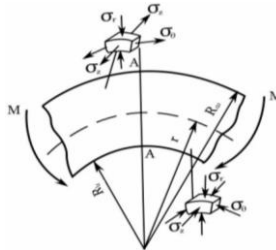


Рис. 5. Схема чистого изгиба полосы

В первом упрощенном методе использованы следующие безразмерные величины компонентов напряжений, применяемых для сплошного материала:

- в растянутых слоях:

$$\bar{\sigma}_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{R_H}, \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \ln \frac{r}{R_H} \right); \quad (6)$$

- В сжатых слоях:

$$\bar{\sigma}_r = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{R_B}, \quad \bar{\sigma}_\theta = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \ln \frac{r}{R_B}\right), \quad (7)$$

где

(8)

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_T}, \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_T}.$$

В табл.1 приведены результаты вычислений в случае внутренних - $R_B = 40$ мм, наружных - $R_H = 80$ мм и граничных - $r = 56.57$ мм радиусов.

Таблица 1

Безразмерные величины напряжений $\bar{\sigma}_r, \bar{\sigma}_\theta$ в поперечном сечении AA полосы

$r, \text{мм}$	80	75	70	65	60	56.57	56.57	55	50	45	40
$\bar{\sigma}_r$	0	-0,0746	-0,154	-0,24	-0,332	-0,4	-0,4	-0,368	-0,258	-0,136	0
$\bar{\sigma}_\theta$	1,156	1,08	1,002	0,916	0,824	0,756	-1,556	-1,523	-1,413	-1,292	-1,156

Используя данные безразмерных напряжений $\bar{\sigma}_r$ и σ_θ для разных материалов, из (8) получаем радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения:

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r \sigma_T, \quad \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta \sigma_T. \quad (9)$$

Предполагается, что для определения радиальных и окружных напряжений в полосе спеченного материала в случае различной пористости v можно использовать предел текучести $\sigma_{T v}$ в зависимости от v , для чего применяется УП ДТППМ, которое отличается от уравнения (5) начальной пористостью материала v_0 :

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} + v_0^m (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{T v}. \quad (10)$$

В (10) задается зависимость предела текучести $\sigma_{T v}$ от пористости спеченного материала:

$$\sigma_{T v} = (1 - v)^{n+0.5} \sigma_{T0}, \quad (11)$$

что позволяет использовать уравнения (9) применительно к любому материалу с начальной пористостью, предварительно определяя пределы текучести $\sigma_{T v}$. В этом случае уравнения (9) примут следующий вид:

$$\sigma_{r v} = \bar{\sigma}_r (1 - v)^{n+0.5} \sigma_{T0} \quad \text{и} \quad \sigma_{\theta v} = \bar{\sigma}_\theta (1 - v)^{n+0.5} \sigma_{T0}. \quad (12)$$

Во втором упрощенном методе окружное напряжение выражается через радиальное. Поэтому используются условие плоской деформации ($\varepsilon_z = 0$) и уравнение связи между деформацией и напряжениями из ДТППМ:

$$\varepsilon_z = \frac{3\varepsilon_{eq}}{2(1-v)^{3n}\sigma_{eq}} [\sigma_z - (1 - 2v_0^m)\sigma_0], \quad (13)$$

где $\varepsilon_{зкв}$ и σ_{eq} - эквивалентные деформация и напряжение; σ_0 - среднее напряжение, определяемое в виде: $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$.

В случае $\varepsilon_z = 0$ из (13) напряжение σ_z представляется в виде радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений:

$$\sigma_z = \frac{1-2\nu_0^m}{2(1+\nu_0^m)} (\sigma_r + \sigma_\theta). \quad (14)$$

В этом случае уравнение (10) сначала представляется напряжениями σ_r , σ_θ и σ_z , а затем приводится к следующему виду:

$$2\sigma_{r0}^2\beta^{2n+1} = [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2] + 2\nu_0^m(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)^2. \quad (15)$$

Согласно (14), исключая σ_z из (15) и преобразуя его, получаем уравнение окружного напряжения σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{-\sigma_r(2\nu_0^{2m} + \nu_0^m - 1) \pm (\nu_0^m + 1) \sqrt{-12\sigma_r^2\nu_0^m(\alpha_0^m + 1) + \sigma_{r0}^2(4\nu_0^{2m} + 5\nu_0^m + 1)(2\beta^{n+0.5})^2/3}}{(4\nu_0^{2m} + 5\nu_0^m + 1)}. \quad (16)$$

Разработан алгоритм для определения компонентов напряженного состояния полосы на основе формул (11) и (16). Численные расчеты проводились в программной среде MathCad для материалов с различной пористостью: 0.05; 0.10; 0.15; 0,20; 0.25 и 0.30. В качестве примера рассмотрены следующие случаи начальной пористости материала: $\nu_0 = 0$ и $\nu_0 = 0,1$, когда $n = 0,25$, $m = 1$, и предел текучести вещества спеченного материала - $\sigma_{r0} = 200 \text{ МПа}$. Получено: $\sigma_{r10\%} = 200 \cdot (0.9)^{0.75} = 184,8 \text{ МПа}$ и

$$\text{при } \nu_0 = 0 - \sigma_\theta = -\sigma_r(-1) \pm \sqrt{200^2 \cdot 4/3} = \sigma_r \pm 230,94; \quad (17)$$

$$\text{при } \nu_0 = 0,1 - \sigma_\theta = 0,57\sigma_r \pm 0,714\sqrt{72444.4 - 1,32\sigma_r^2}.$$

(18)

В табл.2 представлены величины σ_r и σ_θ в поперечном сечении АА полосы.

Таблица 2

Величины напряжений σ_r и σ_θ в сечении АА полосы

$r, \text{ мм}$ $\sigma, \text{ МПа}$	80	75	70	65	60	56.57	56.57	55	50	45	40
$\sigma_r - \nu_0=0$	0	-15,3	-30,8	-48,0	-66,4	-80,0	-80,0	-73,6	-51,6	-27,2	0
$\sigma_\theta - \nu_0=0$	231	216	200	183	165	151	-311	-305	-283	-258	-231
$\sigma_r - \nu_0=0.1$ согласно (12)	0	-13,8	-28,5	-44,4	-61,4	-73,9	-73,9	-68,0	-47,7	-25,2	0
$\sigma_\theta - \nu_0=0.1$ согласно (12)	214	200	185	169	152	140	-288	-282	-261	-239	-214
$\sigma_\theta - \nu_0=0.1$ согласно (18)	193	185	175	164	151	141	-225	-224	216	-206	-193

Значения в первых двух строках табл. 2 определялись уравнениями (9) и (17) ($v_0 = 0$), значения в двух последующих строках – уравнением (12) ($v_0 = 0,1$), а в последней строке - уравнением (18) ($v_0 = 0,1$).

На основе полученных значений напряжений σ_r и σ_θ в поперечном сечении АА полосы построены их эпюры (рис. 6).

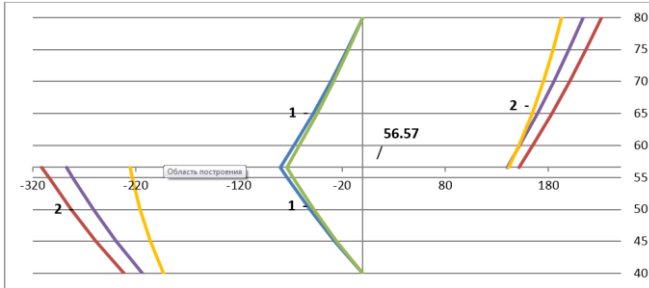


Рис. 6. Эпюры σ_r (кривые 1, 2, 3) и σ_θ (кривые 4, 5) в сечении АА полосы

В третьем упрощенном методе задача решается на опасных, в точки зрения разрушения полосы, ее свободных поверхностях, где отсутствуют радиальные напряжения ($\sigma_r = 0$). Упрощение задачи состоит в том, что не используется дифференциальное уравнение равновесия, поскольку сначала из него определяется радиальное напряжение. Напряжение σ_z определяется для случая плоской деформации ($\varepsilon_z = 0$), которое на основании уравнения ДТППМ выражается через окружное напряжение σ_θ :

$$\sigma_z = \frac{1-2\alpha_0^m}{2(1+\alpha_0^m)} \sigma_\theta. \quad (19)$$

В этом случае УП сначала принимает вид

$$2\sigma_{T0}^2 \beta^{2n+1} = [\sigma_\theta^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \sigma_z^2] + 2\alpha_0^m (\sigma_\theta + \sigma_z)^2. \quad (20)$$

Затем для его преобразования определяются следующие величины: $\sigma_\theta - \sigma_z$, $\sigma_\theta + \sigma_z$. Подставляя их совместно с σ_z в (20), получаем следующее квадратное уравнение для определения окружного напряжения σ_θ :

$$\sigma_\theta^2 = \frac{4\sigma_{T0}^2 (1-\nu)^{2n+1} (1+\alpha_0^m)^2}{3(1+4\alpha_0^{2m}+5\alpha_0^m)},$$

решение которого имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{T0} (1-\nu)^{n+0.5} \sqrt{\frac{1+\alpha_0^{2m}+2\alpha_0^m}{1+4\alpha_0^{2m}+5\alpha_0^m}}. \quad (21)$$

Для определения текущей пористости материала v в точках свободных поверхностей полосы используется следующая формула ДТППМ:

$$v = 1 - (1 - v_0) \exp\left(\frac{-9v_0^m \sigma_0 \bar{\varepsilon}_{eq}}{(1 - v_0)^{3n} \sigma_{eq}}\right). \quad (22)$$

В случае малых пористостей и деформаций величина логарифмической эквивалентной деформации принимается равной логарифмической интенсивности деформации ($\bar{\varepsilon}_{eq} = \bar{\varepsilon}_i$) и определяется методом Н.Н. Малинина, согласно которому она задается величиной логарифмической окружной деформации, например $\bar{\varepsilon}_{\theta 1} = -0.1$, в точках на внутренней поверхности полосы. Для внутренней поверхности полосы получаем $(\bar{\varepsilon}_i)_в = \frac{2}{\sqrt{3}} |\bar{\varepsilon}_{\theta 1}| = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,1) = 0,1156$, а для наружной поверхности полосы: $(\bar{\varepsilon}_i)_н = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,091) = 0,1052$.

В этом случае, принимая $v_0 = 0.05$, $n = 0.25$, $m = 1$ и предел текучести вещества спеченного материала - $\sigma_{т0} = 200 \text{ МПа}$ и $\sigma_{eq} = \sigma_{т0} = 200 \text{ МПа}$, сначала по формулам (19) и (21) определяем величины напряжений σ_z и σ_θ , а также среднее напряжение σ_0 : $\sigma_\theta = 210 \text{ МПа}$, $\sigma_z = 90 \text{ МПа}$, $\sigma_0 = 100 \text{ МПа}$, а затем по формуле (22) - текущую пористость материала.

Для пористости материала на наружной поверхности полосы имеем

$$v_n = 1 - 0,95 \exp\left(\frac{-9 \cdot 0,05 \cdot 100 \cdot 0,1156}{0,9622 \cdot 200}\right) = 0,077, \text{ т.е. } - 7,7\%;$$

на внутренней поверхности полосы

$$v_n = 1 - 0,95 \exp\left(\frac{-9 \cdot 0,05 \cdot (-100) \cdot 0,1052}{0,9622 \cdot 200}\right) = 0,026, \text{ т.е. } - 2,6\%.$$

Численные расчеты показывают, что при 5% начальной пористости полосы, когда окружная логарифмическая деформация на поверхности сжатого слоя составляет 10%, пористость уменьшается до 2,6%, а на растянутой поверхности - увеличивается до 7,7%.

В четвертой главе аналитическим методом и компьютерным моделированием в среде ABAQUS исследованы процессы возникновения первых пластических деформаций и приведения к предельному состоянию шарнирноопертой по концам и с двух концов защемленной статически неопределенной полосы при чистом изгибе (рис. 7).

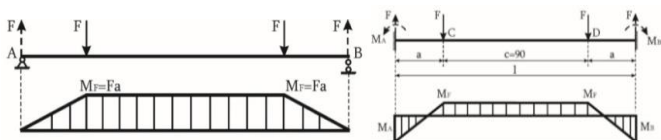


Рис. 7. Случаи чистого изгиба полосы

Модели задач чистого изгиба полосы показаны на рис.8.

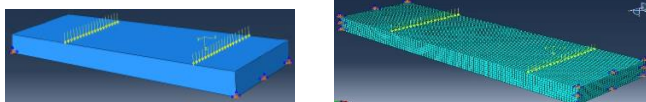


Рис. 8. Модели чистого изгиба полосы

В случаях различных величин силовых воздействий получены значения напряжения Мизеса, окружных и радиальных напряжений, характеризующие напряженное состояние полосы.

Для исследования процессов образования первых пластических деформаций в полосе и приведения их к предельному состоянию (рис.9) используются формы распределения напряжения Мизеса.

В случае шарнирноопертой полосы величины сил, равномерно распределенных с интенсивностью q , составляют 255, 350, 420 и 450 $кН/м$, а в случае защемленной полосы - 830, 1000, 1080 и 1150 $кН/м$.

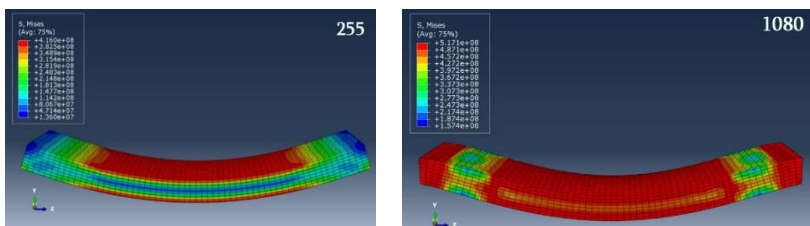


Рис. 9. Распределение напряжений Мизеса в случае шарнирноопертой и защемленной полос

Результаты моделирования полос в среде ABAQUS показывают, что условия их опирания были обеспечены: в случае шарнирноопертой полосы поперечные сечения поворачиваются на шарнирных опорах, а в случае защемленной полосы - углы поворота отсутствуют.

Равномерно распределенные силы (255, 350, 420 и 450 $кН/м$) с интенсивностью q пластической деформации шарнирноопертой полосы

намного меньше сил заземленной полосы (830, 1000, 1080 и 1150 $кН/м$), что объясняется возникновением осевых сил N в случае изгиба заземленной полосы и их влиянием на компоненты напряженно-деформированного состояния.

По данным моделирования в среде ABAQUS проанализированы также величины наиболее важного окружного напряжения σ_θ . Рассмотрен случай изгиба заземленной стальной полосы, когда $q = 1080$ $кН/м$. Из всех компонентов напряженно-деформированного состояния анализируются данные распределения напряжения Мизеса σ_i и окружных напряжений σ_θ . Из рис.10 следует, что окружные напряжения σ_θ на внутренней поверхности составляют $-545,2$ $МПа$, а на внешней поверхности - $+546,1$ $МПа$.

Теоретически окружные напряжения на внешних поверхностях зон растяжения и сжатия определяются простыми аналитическими формулами (6) и (7). По этой причине из данных таблицы о пластических свойствах напряжений Мизеса выбирается соответствующее значение предела текучести - $\sigma_T = 487,1$ $МПа$. По формулам (6) и (7) в зоне растяжения получается: $\sigma_\theta = 563$ $МПа$, а в зоне сжатия: $\sigma_\theta = -563$ $МПа$.

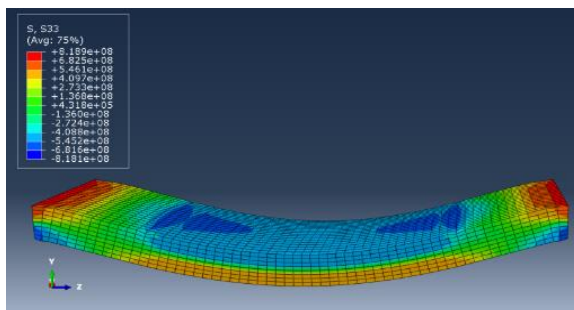


Рис. 10. Распределение окружных напряжений в заземленной полосе $q = 1080$ $кН/м$

Сравнительный анализ результатов, полученных компьютерным моделированием и аналитическим методом, показал, что в случае изгиба стальной заземленной полосы расхождение полученных напряжений в среднем составляет 3,1%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С применением универсального уравнения упругой линии печенной стальной балки определены ее прогибы при различной начальной пористости материала под воздействием равномерной нагрузки. Результаты анализа показали, что при высоких значениях пористости материала прогибы увеличиваются с большей интенсивностью.
2. В результате анализа пористых материалов на основе УП Мизеса выявлены особенности предельных контуров УП для различных значений пористости печенного материала в случае плоских задач.
3. Показано, что предложенный первый упрощенный метод использующий значения безразмерных напряжений для сплошных неупрочняемых материалов, может быть успешно применен и для печенных материалов с любой начальной пористостью путем предварительного определения их пределов текучести.
4. В случае применения предложенного второго упрощенного метода используется формула эквивалентного напряжения ДТШПМ, а в случае изгиба печенной полосы с разной пористостью получены формулы для определения значений окружных напряжений σ_θ .
5. Анализ результатов расчетов, проведенных в программной среде MathCad со сплошным материалом ($v_0 = 0$), а также с шагом пористости $\Delta v_0 = 0,05$ при начальных значениях пористости в пределах $v_0 = 0,05 \dots 0,3$, и определение величин пределов текучести, радиальных и окружных напряжений слоев, а также их распределения в зависимости от пористости в поперечных сечениях показал, что с увеличением исходной пористости материала абсолютные значения окружных напряжений уменьшаются.
6. В случае малых пористостей и деформаций на опасных, с точки зрения разрушения печенной полосы, внешних поверхностях, где радиальные напряжения отсутствуют, с применением предложенного третьего упрощенного метода определены расчетные значения других компонентов напряженно-деформированного состояния и пористости материала.

7. Впервые вычислены компоненты напряженного состояния путем моделирования в среде ABAQUS процессов чистого изгиба полос из упрочненного материала с различными схемами нагружения и степенями деформирования (возникновение первых пластических деформаций и приведение их к предельному состоянию). Сравнительный анализ результатов полученных окружных напряжений при появлении первой пластической деформации в случае изгиба защемленной стальной полосы с аналитическими данными показал, что расхождение составляет в среднем 3,1%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Պետրոսյան Գ.Լ., Հակոբյան Ն.Գ.** Եռակալված նյութից հեծանի առանձալակ ծռման առանձնահատկությունները // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա.-Եր., 2017.- Հատոր 70, №1.- Էջ 11-17:
2. **Պետրոսյան Գ.Լ., Հակոբյան Ն.Գ.** Հարթ դեֆորմացման խնդիրների լուծման դեպքում պլաստիկության սահմանային եզրագծի հաշվառման առանձնահատկությունները // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.-Եր., 2017.- Մաս 2.- Էջ 513-520:
3. **Петросян Г.Л., Акопян Н.Г.** Особенности формоизменения пластического предельного контура в задачах плоского деформирования спеченного материала // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера XXI века”.-Донецк, 2017.-С. 307-310.
4. **Петросян Г.Л., Акопян Н.Г., Левонян Г.Л.** Исследование напряженного состояния изогнутой спеченной широкой полосы// Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение.- Ереван, 2018.- N1.-С. 9-17.
5. **Հակոբյան Ն.Գ.** Տարբեր ծակոտկենությանը եռակալված ծռման ենթարկված շերտերի շրջանային լարումների որոշման առանձնահատկությունները// ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. տեխն. գիտ. սերիա.-Եր., 2017.- Հատոր 70, №3.- էջ 241-247:
6. **Պետրոսյան Գ.Լ., Հակոբյան Ն.Գ.** Ծոված լայն շերտի ազատ մակերևույթների վրա լարումների որոշման պարզեցված մեթոդ// ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.-Եր., 2019.- Մաս 2.- էջ 271-279:

7. **Акопян Н.Г.** Компьютерное моделирование и исследование изгиба широкой полосы// Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение.-Ереван, 2019.- N1.-С. 52-59.
8. **Petrosyan G.L., Verlinski S.V., Hakobyan N.G., Margaryan M.A.** Investigation of wide stripepure bending plastic deformationin freely supported and restrained beam schemes// AIP Conference Proceedings 2166, 020014 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5131601> Published Online.- 25 October 2019.- P.1-7.

Նարե Գարիկի Հակոբյան

**ԱՄՐՎԱՏԱՐԵՖԵՐԱՆՈՒՄՍԱՅԻՆՈՒ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՇԵՐՏԱԶԵՎ
ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ՊԼԱՍՏԻԿ ԾՈՄԱՄԲ ՊՍՏԻՄՍՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ**

ԱՍՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսության նպատակն է հոծ և եռակալված նյութերից շերտաձև մեքենամասերի պլաստիկ մաքուր ծոման գործընթացների լարվածադեֆորմացիոն վիճակների հետազոտումը, որն ուղղված է տրված ֆիզիկամեխանիկական հատկություններով արտադրատեսակների ստացմանը:

Առաջին գլխում կատարվել է ատենախոսության թեմայի վերաբերյալ գրականության վերլուծություն: Քննարկվել են հեծանի առաձգական և առաձգապլաստիկ դեֆորմացման, ինչպես նաև թերթի ու շերտի պլաստիկ մաքուր ծոմանը նվիրված հետազոտությունները:

Երկրորդ գլխում, օգտագործելով եռակալված պղնձյա փոշենյութի համար ստացված Յունգի մոդուլի և հարաբերական խտության փորձարարական տվյալները, կառուցվել է Յունգի մոդուլի ծակոտկենությունից կախված գրաֆիկը, որը մոտարկվել է գծային ֆունկցիայով: Որոշվել են հավասարաչափ բաշխված բեռի ազդեցությամբ, տարբեր սկզբնական ծակոտկենություն ունեցող, եռակալված պողպատե երկու ծայրերը հողակապային հենարանների վրա դրված հեծանի ձկվածքները և համեմատվել են ստացված արդյունքները:

Կատարվել է հոծ և եռակալված նյութերից մեքենամասերի տարբեր լարվածային վիճակների դեպքերում Տրեսկա-Մեն-Վենանի, Միգեսի, ինչպես նաև եռակալված նյութերի՝ Միգեսի պլաստիկության պայմանի (ՊՊ) հիման վրա ստեղծված ծակոտկեն նյութերի ՊՊ-ների վերլուծություն:

Քննարկվել են տարբեր սկզբնական ծակոտկենության նյութերի գծային և հարթ լարվածային վիճակների դեպքերը, որոնց վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նյութի ծակոտկենությունը զգալի ազդեցություն է թողնում սահմանային ՊՊ-ի գրաֆիկների ինչպես չափսերի, այնպես էլ ձևի փոփոխման վրա:

Երրորդ գույսը նվիրված է եռակալված նյութից մաքուր ծոման ենթարկված լայն շերտի լարվածային վիճակի հետազոտությանը հարթ դեֆորմացման պայմանում: Օգտագործելով ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության հավասարումները, մշակվել են խնդրի լուծման երեք պարզեցված մեթոդներ:

Առաջին դեպքում օգտագործվել են հոծ չամրացվող նյութերի համար լարումների չափագուրկ մեծությունները և ցույց են տրվել, որ դրանք կիրառելի են ինչպես ցանկացած հոծ նյութի, այնպես էլ ցանկացած սկզբնական ծակոտկենությամբ եռակալված նյութի համար՝ նախապես որոշելով դրանց հոսունության սահմանները:

Երկրորդ դեպքում ստացվել է շրջանային լարման որոշման համար քառակուսային հավասարում, ինչը հնարավորություն է տալիս ստանալ շրջանային լարման որոշման ընդհանուր բանաձև՝ արտահայտված նյութի հոսունության սահմանով ու շառավղային լարումով:

Երրորդ դեպքում խնդիրը լուծվում է շերտի քայքայման տեսակետից վտանգավոր ձգված մակերևույթներում, որտեղ բացակայում են շառավղային լարումները, իսկ շերտի ձգված մակերևույթում ստացված շրջանային լարումները պատճառ են դառնում նյութի սկզբնական ծակոտկենության մեծացման: Թվային հաշվարկները ցույց են տալիս, որ շերտի 5% սկզբնական ծակոտկենության դեպքում, երբ սեղմված շերտի մակերևույթում շրջանային դեֆորմացումը 10% է, դրանում ծակոտկենությունը փոքրացել է՝ դառնալով 2.6%, իսկ ձգված մակերևույթում մեծացել է 7.7% - ով:

Չորրորդ գլխում վերլուծական մեթոդով և ABAQUS միջավայրում մոդելավորմամբ հետազոտվել են երկու ծայրերն ամրակցված ստատիկորեն անորոշելի և հոդակապային հենարանների վրա դրված հեծանների ամրացվող նյութից շերտի մաքուր ծոման դեպքում առաջին պլաստիկ դեֆորմացիաների առաջացման և սահմանային վիճակի բերման գործընթացները: Դրա համար օգտագործվում են Միզեսի լարման բաշխման տեսքերը:

Համակարգչային մոդելավորմամբ ստացված շերտի շրջանային լարման արժեքները համեմատվել են վերլուծական մեթոդով որոշված տվյալների հետ: Ընդ որում, շրջանային լարումները պարզ վերլուծական բանաձևերով որոշվել են շերտի ձգման և սեղմման գոտիների արտաքին մակերևույթներում: Ցույց է տրվել, որ պողպատե լայն շերտի ծոման դեպքում ստացված լարումների միջինացված տարբերությունը կազմում է 3,1%:

Nare Garik Hakobyan

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE STRIPEFORM PART OF
MACHINE IN CASE OF MANUFACTURING BY PLASTIC BEND

SUMMARY

The purpose of the work is to study the stress state of the process of plastic-pure bending of a layer of sintered material by methods of analytical and computer modeling, which will improve the technological process for obtaining products with specified physical and mechanical characteristics.

The first chapter analyzes different viewpoints regarding the subject of the study and goes through the researches on elastic and elastoplastic deformation of beams, as well as pure plastic bending of a sheet and strip.

In the second chapter, applying Young's modulus obtained for sintered copper powder and experimental data on relative density, the graph is constructed depending on Young's modulus porosity, which is approximated by a linear function. The bends of a sintered steel beam with different initial porosity located at the two ends of the pivot bearings were determined by the effect of a uniformly distributed load, and the results were compared to each other.

The analysis is carried out on the plasticity conditions of porous materials with parts of solid and porous materials under various degrees of pressure under Tresca-Cena-Venant, Mises, as well as analysis on Mises plasticity of sintered materials.

Casestudies were detailed connected the materials with different initial porosity under uniaxial and biaxial pressure, indicating the porosity of the material has a significant effect on the change in both the size of the boundary curves of plasticity and in their shape.

The third chapter handles out with pure plastic bending of a strip of sintered non-hardening material under plane deformation. Moreover, the problem is solved by three simplified methods using the formulas of deformation theory of plasticity of porous materials.

The first simplified method used dimensionless standard pressure values for a solid non-strengthening material. It proved to be applicable to any material with an initial porosity, having previously determined its yield strength.

The second method applies the square equation to find out circular stress, powering a general formula for determining the circumferential stress, expressed by the yield strength of the material and the radial stress.

The third simplified method handles the issue by the decomposition of the layer with no radial stress and the circumferential stress on the stretched surface of the layer increase the initial porosity of the material. Numerical calculations show that at 5% of the initial porosity of the layer, when the circumferential deformation on the surface of the compressed layer is 10%, the porosity decreases to 2.6%, and on the stretched surface it increases to 7.7%.

The fourth chapter examines the processes of the appearance of the first plastic deformations while pure bending of a layer of material fixed on statically indeterminate and hinged supports mounted on articulated supports via analytical method and modeling in the ABAQUS environment. Therefore, the Mizes stress distribution forms are used.

The values of the circumferential stress of the layer, obtained by computer modeling, were compared to the data collected by the analytical method. Moreover, the circumferential stress was determined by simple analytical formulas on the outer surfaces of the tension and compression layer. It investigated that the difference between the stress obtained while bending a wide strip of steel is 3.1% on average.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'H. H. H.', located at the bottom right of the page.