

Государственный университет Акакия Церетели
Инженерно-технический факультет

На правах рукописи

Булекбаева Гулмира Жайбергеновна

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

0408 - Механика инженерии и технология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание академической степени
доктора инженерии

Кутаиси 2016

Государственный университет Акакия Церетели

Научные руководители: доктор технических наук, профессор Киквидзе О. Г.

кандидат технических наук, профессор Кипиани П.Н.

Официальные рецензенты:

Защита состоится _16.07.____ 2016 года в 14 часов, на заседании диссертационной комиссии, созданной диссертационным советом инженерно-технического факультета. Адрес: 4600, г. Кутаиси, ул. Тамар мепе, № 59, аудитория № 1114.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного университета Акакия Церетели по адресу: г. Кутаиси, ул. Тамар мепе, № 59.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Секретарь

диссертационного совета

ассоциированный профессор

/Н. П. Саханберидзе/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей задачей машиностроительного производства является повышение надежности и долговечности деталей машин. Решение этих вопросов прямо зависит от создания и освоения прогрессивных ресурсосберегающих технологических методов улучшения качества деталей и повышения их износостойкости, снижения себестоимости, увеличения производительности и улучшения условий труда.

Путем наплавки получают изделия с износостойкими, жаростойкими, антифрикционными, кислотоупорными, и тому подобными свойствами. Если в машиностроительном производстве наплавку применяют для повышения износостойкости трущихся поверхностей, т.к. она позволяет значительно увеличить срок службы деталей и сократить расходы дефицитных материалов на их изготовление, то в ремонтном производстве - в основном для проведения последующих работ по восстановлению расположения, формы и размеров изношенных элементов.

Анализ современных методов наплавки показывает, что для наплавленного металла характерны ряд факторов, которые в комплексе приводят к значительному снижению износостойкости нанесенного металлопокрытия деталей: значительный разброс механических свойств; наличие включений и металлургических дефектов; неоднородность структуры и неравномерность поверхностной твердости по длине детали; наличие неблагоприятных растягивающих напряжений; снижение усталостной прочности наплавленных деталей; трудность механической обработки.

Повышение качества металлопокрытия и износостойкости восстановленных деталей является важной задачей на ремонтных предприятиях машиностроения. Повышение износостойкости деталей позволяет, в известной мере, разрешить задачу повышения долговечности машин.

Одним из этапов технологического процесса наплавки является поверхностное пластическое деформирование. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это вид упрочняющей обработки, при котором не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя заготовки, распространенный и эффективный способ повышения несущей способности металлических деталей машин. Применение ППД позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред и имеющих концентраторы напряжений.

Цель работы. Разработка методов теоретического и экспериментального исследования пластического деформирования наплавленного слоя при восстановлении плоских поверхностей деталей

Основные задачи работы. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи: 1. Выбрано уравнение состояния материала при повышенных температурах на основе технической теории ползучести - упрочнения; 2. Сформулирована одномерная задача продольной обкатки наплавленного слоя цилиндрическим роликом с учетом закона трения Кулона на поверхности контакта материала с роликом и получены формулы, для расчета напряженно-деформированного состояния в очаге деформации на основе теории упрочнения; 3. Проведено численное решение одномерной нелинейной задачи и определены компоненты напряжений, силовые факторы технологического процесса с использованием математического редактора Mathcad; 4. Сформулирована

двумерная задача продольной обкатки наплавленного слоя на основе теории упрочнения, получена замкнутая система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и записаны граничные условия; 5. Разработан алгоритм решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей; 6. Проведено экспериментальное исследование качества наплавленного слоя при восстановлении плоской поверхности.

Практическая ценность работы. Разработаны методы расчета нелинейных задач пластического деформирования наплавленного слоя при продольной обкатке на основе теории упрочнения. Теория упрочнения описывает состояние широкого класса металлических материалов в широком температурном интервале. Разработана прикладная программа для расчета напряженно-деформированного состояния и силовых параметров технологического процесса в системе Mathcad, что позволяет упростить и автоматизировать сложные инженерные расчеты. Дана методика экспериментального исследования технологического процесса наплавки слоя на плоской поверхности.

Полученные результаты и разработанные методы могут быть использованы практическими специалистами машиностроительных предприятий для расчетов параметров технологического процесса при восстановлении поврежденных поверхностей деталей. Разработанные методики могут быть использованы в процессе обучения студентов старших курсов и магистрантов.

Положения, выносимые на защиту. 1. Методика расчета одномерной задачи продольной обкатки наплавленного слоя на основе теории упрочнения; 2. Расчет компонентов напряжений в очаге деформации и силовых факторов технологического процесса в системе Mathcad; 3. Методика расчета двумерной задачи продольной обкатки методом конечных разностей; 4. Методика экспериментального исследования технологического процесса наплавки на плоской поверхности; 5. Методика оценки качества наплавленного слоя.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на конференции III International Scientific Conference ENERGY:REGIONAL PROBLEMS AND DEVELOPMENT OPPORTUNITIES (Kutaisi 2015г.), на научных семинарах департамента «механика-машиностроение», государственного университета Ак. Церетели (2014 г., 2015г., 2016г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 научных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных результатов и выводов, списка литературы и приложений, напечатана и сверстана на компьютере. Работа содержит 101 страниц, включая 31 рисунков, 3 таблиц и 1 приложение. Список литературы включает 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и ее практическая ценность

В первом разделе приводится краткое описание технологии наплавки для восстановления поврежденных поверхностей деталей и дана классификация методов наплавки. Рассмотрен вопрос о выборе сварочных материалов, применяемых при наплавке для получения наплавленного слоя заданного качества при восстановлении деталей. Одним из ключевых моментов получения качественного слоя является предупреждение дефектов типа трещин и неровностей поверхности. Представлены пути предупреждения образования дефектов типа холодных и горячих трещин.

Для улучшения качества наплавленного слоя применяют пластическое деформирование при повышенных температурах. Одним из методов термомеханической обработки является продольная обкатка наплавленного слоя жестким цилиндрическим роликом. Осуществление технологического процесса зависит от выбора температуры деформирования и знания силовых параметров формоизменения.

Базируясь на работах В.И.Махненко, А.А.Орлова, Н.И.Бойко, на основе известных методических подходов Н.Н.Рыкалина, получены ряд решений, позволяющих определить температуру наплавленного металла в зонах пластической деформации. Температура наплавленного валика в зоне деформации определяется по общеизвестному уравнению А.А.Орлова, применительно к наплавке толстостенных или сплошных цилиндров. Температура любой точки наплавленного металла в зоне деформации детали, сразу после прекращения действия источника тепла, определяется формулой Н.Н.Рыкалина.

Задачи расчетов технологических процессов обработки металлов обычно решаются на основе одной из принятых в теории пластичности моделей тел (чаще всего жестко-идеально пластического, иногда упруго - идеально пластического или жестко-упрочняющегося тела). В работе Д.Х.Касрадзе дан расчет сопротивления деформированию при термомеханической обработке наплавленных поверхностей. Рассматривается одномерная задача определения напряжений в очаге деформации на основе гипотезы плоских сечений. Считается, что нормальные напряжения в поперечном сечении постоянны, деформированное состояние плоское. Условие пластичности в очаге деформации записано с использованием, так называемого вынужденного предела текучести в виде $K = \beta\sigma_T$, здесь σ_T - базовый предел текучести, $\beta = 1 - 1,5$ коэффициент Лодэ.

Поскольку в таком случае в уравнения состояния не входят скорости деформаций, эти решения не позволяют отразить скорости движения деформирующего инструмента на усилия формоизменения и напряженно-деформированное состояние наплавленного слоя.

Это влияние особенно значительно, если металл деформируется при высоких температурах и напряжениях. В таком случае, несмотря на сравнительно небольшое время деформирования, существенное значение имеет вязкость металла и поэтому расчеты технологических процессов обработки металлов следует основывать на уравнениях состояния, в которых содержатся скорости деформаций, т.е. на уравнениях, отражающих реологические свойства металлов – на уравнениях теории ползучести.

Реологические модели для описания технологических задач пластического формоизменения металлов использованы в трудах Г.Генки, А.А.Ильюшина,

А.Ю.Ишлинского, Н.Н.Малинина, К.И.Романова, О.Зенковича, Н.Кристеску, С.Танга, Д.Дурбана и др.

Во втором разделе рассматривается одномерная задача обкатки наплавленного слоя на основе теории ползучести - упрочнения. Уравнение состояния материала принимается в виде:

$$\sigma_e = a \xi_e^m \kappa^n \quad (1)$$

где $\kappa = \int \xi_e dt$ - параметр Удквиста, σ_e - эквивалентное напряжение, ξ_e - эквивалентная скорость деформации, a, m, n - постоянные материала при определенной температуре.

Рассматривается деформирование материала под действием абсолютно жесткого цилиндрического тела (ролика), которое совершает плоскопараллельное движение в плоскости чертежа (рис.1). Деформируемый материал находится на жесткой поверхности. Обозначим скорость перемещения центра ролика через v_0 , а угловую скорость вращения - ω . Считается, что они постоянные во времени величины.

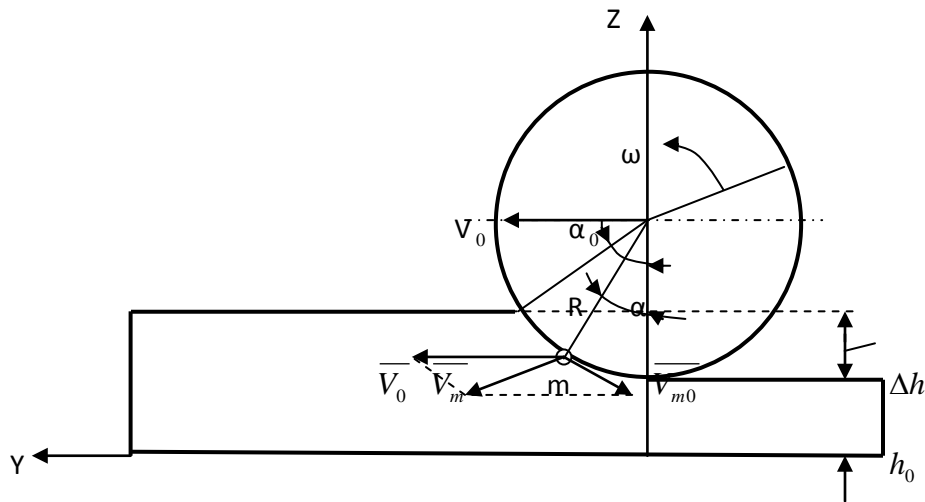


Рис.1 Схема обкатки

R -радиус ролика, Δh -изменение толщины слоя, h_0 -толщина прокатанного слоя, α_0 – максимальный угол контакта, α -угловая координата точки m , ω -угловая скорость вращения ролика, \vec{V}_0 – вектор скорости перемещения центра ролика, \vec{V}_m - вектор скорости перемещения точки m на поверхности контакта, \vec{V}_{m0} -вектор скорости вращения точки m относительно центра ролика

Компоненты скорости перемещения любой точки на поверхности контакта материала с роликом в очаге деформации показаны на рис.1:

$$v_y = v_0 - \omega R \cos \alpha; v_z = -\omega R \sin \alpha. \quad (2)$$

Предполагается, что напряженно-деформированное состояние материала меняется только по координате y . Тогда уравнение равновесия элементарного объема имеет вид:

$$\frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{\sigma_y + p}{h} \operatorname{tg} \alpha + \frac{q - q_1}{h} = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_z = p - q \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

где σ_y, σ_z – компоненты напряжений, p, q – давление и интенсивность сил трения, соответственно, на поверхности контакта материала с роликом, q_1 – интенсивность сил трения материала с жесткой поверхностью.

Эквивалентное напряжение σ_e приближенно вычисляется как:

$$\sigma_e = \sigma_y - \sigma_z. \quad (5)$$

Для упрощения решения принимается, что трение на поверхности контакта материала с роликом подчиняется закону Кулона $q = \mu p$, причем коэффициент пропорциональности μ постоянен по всей поверхности контакта. Интенсивность сил трения на поверхности контакта материала с жесткой поверхностью принимается пропорциональной максимальному касательному напряжению

$$q_1 = \chi \tau_{\max} = \chi(\sigma_y - \sigma_z)/2 = \chi \sigma_e / 2, \quad (6)$$

где χ – постоянный коэффициент пропорциональности. При $\chi = 1$ имеет место прилипание.

После несложных преобразований дифференциальное уравнение (3) представлено в виде:

$$\frac{d\sigma_y}{d\alpha} + \psi_1(\alpha)\sigma_y = \psi_2(\alpha), \quad (7)$$

где введены обозначения:

$$\psi_1(\alpha) = \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\sin \alpha + \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (8)$$

$$\psi_2(\alpha) = \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} + \frac{\chi}{2} \cos \alpha \right) \sigma_e.$$

Для интегрирования уравнения (7) имеем граничное условие: $\alpha = 0, \sigma_y = 0$. Тогда решение уравнения запишется следующим образом:

$$\sigma_y = \exp\left(-\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) \int_0^\alpha \psi_2 \exp\left(\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) d\alpha . \quad (9)$$

Для скорости деформаций в продольном направлении и эквивалентной скорости деформации имеем:

$$\xi_y = \omega \operatorname{tg} \alpha, \xi_e = 2\omega \operatorname{tg} \alpha / \sqrt{3} . \quad (10)$$

Параметр Удквиста, с учетом соотношения $dt = d\alpha/\omega$, имеет вид: $\kappa = -2 \ln|\cos \alpha|/\sqrt{3}$. В таком случае эквивалентное напряжение вычисляется по формуле:

$$\sigma_e = a(2/\sqrt{3})^{m+n} \omega^m \operatorname{tg}^m \alpha (-\ln|\cos \alpha|)^n .$$

Давление на поверхности контакта материала с роликом определяется соотношением $p = (\sigma_y - \sigma_e)/(1 - \mu \operatorname{tg} \alpha)$. Деформация в продольном направлении равняется:

$$\varepsilon_y = \int_0^t \xi_y dt + \varepsilon_y^0 = -\ln|\cos \alpha| + \varepsilon_y^0, \quad (11)$$

где ε_y^0 – остаточная деформация после наплавки.

Для того, чтобы полностью устранить остаточные продольные деформации должно выполняться условие $\ln|\cos \alpha| = \varepsilon_y^0$. Соответствующий угол контакта:

$$\alpha_0 = \arccos[\exp(\varepsilon_y^0)] . \quad (12)$$

С другой стороны, максимальный угол контакта (рис.1)

$$\alpha_0 = \arcsin\left[2\sqrt{\Delta h/(2R)}\right], \quad (13)$$

где Δh – уменьшение толщины слоя.

Сопоставляя формулы (12) и (13), находим:

$$\Delta h = R[1 - \exp(2\varepsilon_y^0)]/2 . \quad (14)$$

Если известна величина остаточной продольной сварочной деформации, то по формулам (12) и (14) определяются максимальный угол контакта материала с роликом и деформация $\varepsilon_z = \Delta h/h$ по толщине элемента в зоне обкатки слоя.

Момент сил на единицу длины в направлении, перпендикулярном чертежу, в предположении, что момент сил контактных давлений относительно центра ролика можно пренебречь, равен

$$M = \mu R^2 \int_0^{\alpha_0} p d\alpha .$$

Проекция на вертикальную ось силы, приходящейся на единицу длины в направлении перпендикулярном чертежу:

$$P_z = R \int_0^{\alpha_0} (p \cos \alpha - q \sin \alpha) d\alpha .$$

Проекция на горизонтальную ось силы, приходящейся на единицу длины в направлении перпендикулярном чертежу:

$$P_y = R \int_0^{\alpha_0} (p \sin \alpha + q \cos \alpha) d\alpha .$$

В полученных выше формулах интегралы вычисляются численно. Для этого введены безразмерные величины:

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e}{a\omega^m}, \bar{\sigma}_{y,z} = \frac{\sigma_{y,z}}{a\omega^m}, \bar{p} = \frac{p}{a\omega^m}, \bar{M} = \frac{M}{a\omega^m R^2}, \bar{P}_{y,z} = \frac{P_{y,z}}{a\omega^m R}, \bar{q} = \frac{q}{a\omega^m}, \bar{v}_{y,z} = \frac{v_{y,z}}{\omega R}$$

$$\bar{\psi}_2(\alpha) = \psi_2(\alpha)/(a\omega^m), \bar{\xi}_{e,y} = \frac{\xi_{e,y}}{\omega}, \Delta \bar{h} = \frac{\Delta h}{R}, \lambda = \frac{h_0}{R} .$$

В качестве примера был проведен расчет деформирования материала для следующих значений постоянных: $m = 0,147; n = 0,157; \mu = 0,3; \chi = 1; h_0 / R = 0,1$. Величина остаточной деформации принималась $\varepsilon_y^0 = -8,7 \cdot 10^{-3}$. Величина $\Delta h / R = 8,7 \times 10^{-3}$. На рис.2 показаны распределения безразмерных величин компонентов напряжения и эквивалентного напряжения в очаге деформации. Как видно из рис.2, в осевом направлении напряжения положительны, поэтому остаточные растягивающие напряжения после сварки будут увеличиваться при обкатке шва.

На рис.3 показано изменение остаточной деформации в продольном направлении, а на рис.4 - распределение безразмерной величины контактного давления. Величины силовых факторов действующих на ролик равны: $\bar{P}_y = 4.1 \times 10^{-3}, \bar{P}_z = 0.011, \bar{M} = 3.4 \times 10^{-3}$. На рис.5 даны графики изменения безразмерных значений сил и момента в зависимости от угла контакта. По этим графикам можно установить значения силы и момента деформирования и определить требуемую мощность технологического оборудования.

Расчеты показывают, что можно подобрать параметры μ и λ так, чтобы существенно уменьшить напряжения в направлении оси y (рис.6). При определенных значениях λ , силы трения q меняют направление на малом участке поверхности контакта.

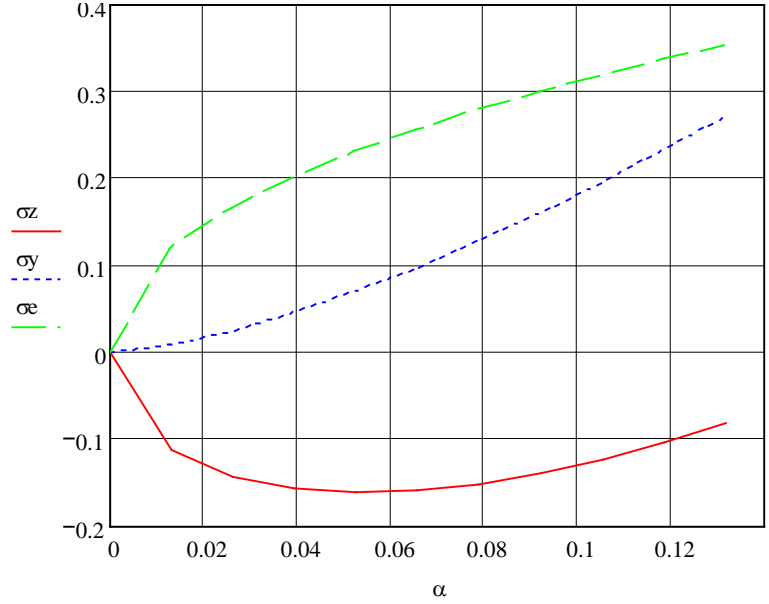


Рис.2 Распределение компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации

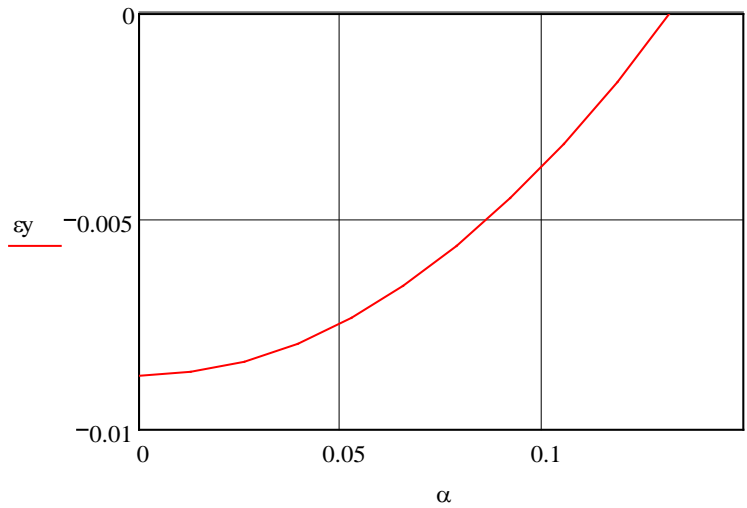


Рис.3 Изменение остаточной деформации в осевом направлении слоя

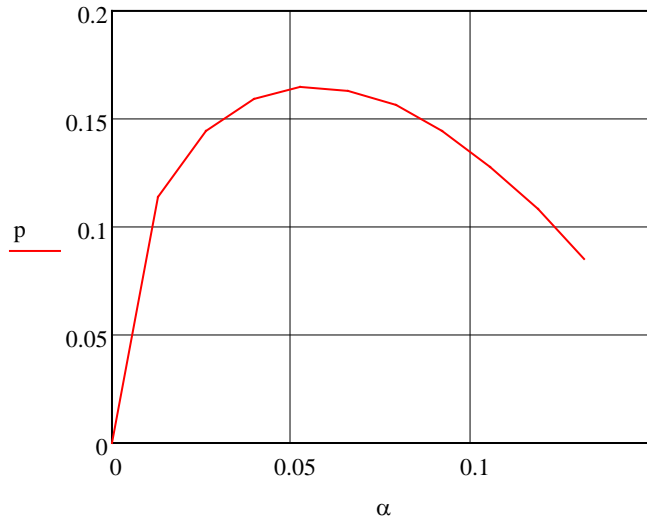


Рис.4 Распределение контактного давления на ролик

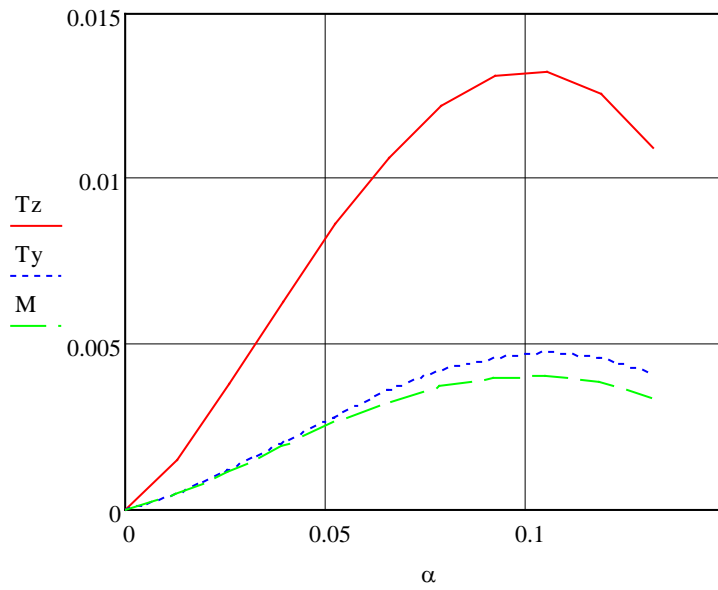


Рис.5 Силы и момент, действующие на ролик

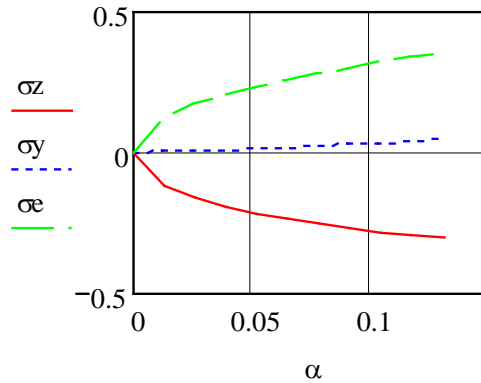


Рис.6 Распределение компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации для значений $\mu = 0,3$; $\lambda = 0,5$.

Таким образом, в одномерной постановке получены сравнительно общие формулы для расчета напряженно-деформированного состояния, давления и сил трения на поверхности контакта, усилий и момента, действующих на ролик.

В третьем разделе рассматривается двумерная задача пластического деформирования наплавленного слоя при обкатке цилиндрическим роликом, который совершает плоскопараллельное перемещение в плоскости (x, z) . Применяется прямоугольная система координат x, y, z . Рассматривается плоское деформирование и считается, что напряженно-деформированное состояние не зависит от координаты y . Компоненты скоростей перемещений в очаге деформации: $v_z = v_z(x, z), v_x = v_x(x, z), v_y = 0$. Компоненты тензора напряжений $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, z); i, j = x, y, z; \tau_{zy} = 0, \tau_{xy} = 0$. За полные деформации принимаются деформации ползучести.

Компоненты скоростей деформаций в рассматриваемом случае вычисляются по формулам:

$$\xi_x = \partial v_x / \partial x, \xi_z = \partial v_z / \partial z, \xi_y = 0, \eta_{xz} = \partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x . \quad (15)$$

Условие несжимаемости материала имеет вид:

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_z / \partial z = 0 . \quad (16)$$

Эквивалентная скорость деформации и параметр Удквиста равняются:

$$\xi_e = 2/\sqrt{3}\sqrt{(\partial v_x/\partial x)^2 + (\partial v_x/\partial z + \partial v_z/\partial x)^2/4}, \quad \kappa = \int \xi_e/v_x dx. \quad (17)$$

Компоненты тензора напряжений вычисляются зависимостями Сен-Венана-Леви-Мизеса: $\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + 2\sigma_e \xi_{ij}/(3\xi_e)$, где: σ_0 – среднее напряжение $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$; δ_{ij} – символ Кронекера.

Дифференциальные уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial^3 v_x}{\partial z^3} + \frac{\partial^3 v_z}{\partial x \partial z^2} - \frac{\partial^3 v_x}{\partial x^2 \partial z} - \frac{\partial^3 v_z}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^3 v_x}{\partial z \partial x^2} \right) - \\ & \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + 4 \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \\ & + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

Уравнения в системе (18), с учетом уравнения состояния (1), зависимостей (17) являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скоростей перемещений и среднего нормального напряжения.

Для интегрирования дифференциальных уравнений имеем граничные условия: $z = 0, v_z = 0; v_x = 0$. На поверхности контакта материала с роликом скорости перемещения равняются: $(z, x) \in L; v_z = \omega R \sin \alpha, v_x = v_0 - \omega R \cos \alpha$, где L – дуга окружности с центральным углом α_0 , $0 \leq \alpha \leq \alpha_0; R$ – радиус ролика. На боковых поверхностях $x = 0, x = a$ имеем условие, равенство нулю суммарной силы в направлении оси x , $\int \sigma_x dz = 0$.

Интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями необходимо вести численными методами. Широко распространенными являются разностные методы. Применяется центральная конечно-разностная схема с использованием итерационного процесса. задается нулевое приближение для скорости перемещения v_z (или v_x), из условия несжимаемости определяем скорость перемещения v_x (или v_z), определяем эквивалентную скорость деформации, параметр Удквиста и из уравнений равновесия находим среднее нормальное напряжение и скорость перемещения v_z (или v_x). Сравниваются заданное и полученное значения скорости перемещения на каждом шаге итерации.

Для численного решения задачи используются приведенные выше безразмерные величины, а также величины $\bar{x} = x/h_0, \bar{z} = z/h_0$ (h_0 - высота наплавленного слоя до деформации). Компоненты скоростей деформации, эквивалентная скорость деформации, параметр Удквиста и уравнение состояния в безразмерных величинах имеют вид:

$$\bar{\xi}_x = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}, \bar{\xi}_z = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}}, \bar{\eta}_{xz} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right),$$

$$\bar{\xi}_e = 2/(\lambda\sqrt{3}) \sqrt{(\partial \bar{v}_x / \partial \bar{x})^2 + (\partial \bar{v}_x / \partial \bar{z} + \partial \bar{v}_z / \partial \bar{x})^2 / 4}, \bar{\kappa} = \lambda \int \bar{\xi}_e / \bar{v}_x d\bar{x}, \bar{\sigma}_e = \bar{\xi}_e^m \bar{\kappa}^n. \quad (19)$$

Введено обозначение $\psi = \bar{\sigma}_e / \bar{\xi}_e$. Используя соотношения (19) для функции ψ имеем:

$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \left\{ \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x} \right\}^n. \quad (20)$$

Для вычисления интеграла в правой части уравнения (20) введено обозначение:

$$\varphi(\bar{x}, \bar{z}) = \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x}. \quad (21)$$

Для функции $\varphi(\bar{x}, \bar{z})$ имеем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} = \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x. \quad (22)$$

С учетом выражения (21) функция ψ принимает вид:

$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \varphi^n(\bar{x}, \bar{z}). \quad (23)$$

Используя приведенные выше обозначения, дифференциальные уравнения (18) записаны в форме:

$$\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{x}^2} \right) + 4 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}} + \psi \left(\frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^3} + \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x}^3} + 3 \frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}^2} \right) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_0}{\partial \bar{x}} + \frac{2}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{x}} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{3\lambda} \psi \left(2 \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} \right) + \frac{1}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) = 0$$

Построение разностной схемы решения дифференциальных уравнений в частных производных основано на введении сетки в рассматриваемом пространстве (рис.7). Узлы сетки являются расчетными точками.

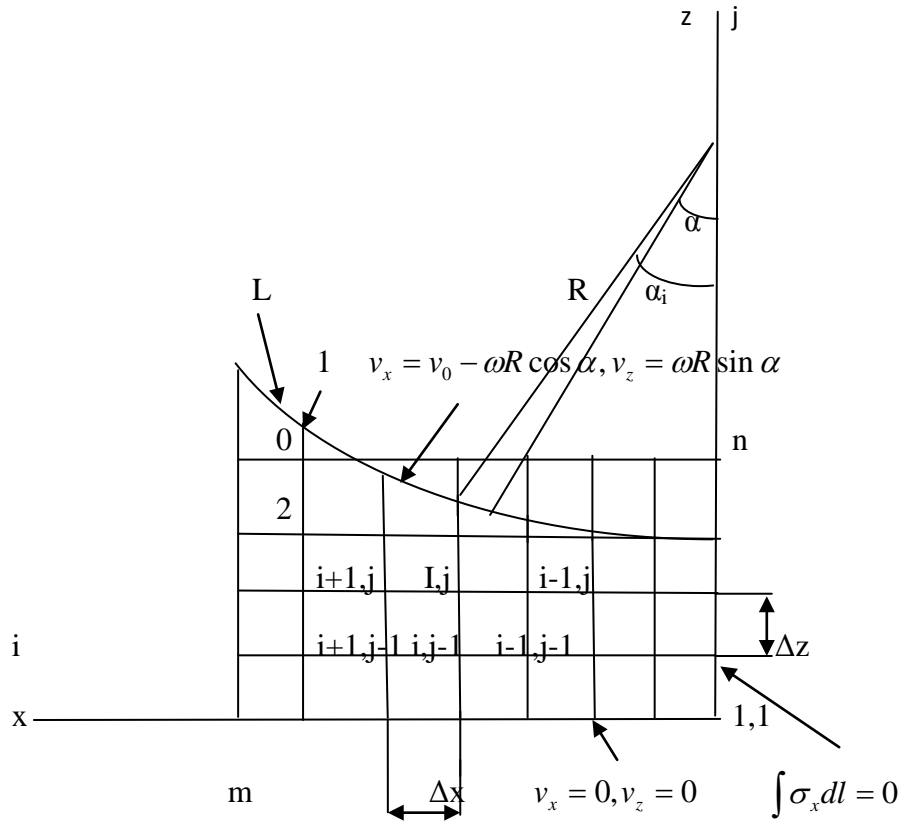


Рис.7 Прямоугольная сетка деления области интегрирования

Основные уравнения в конечных разностях имеют вид:

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i-1,j} + \Delta \bar{x} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right]^{1/2} / \bar{v}_{xi,j},$$

$$\psi_{i,j} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right]^{m-1} \varphi_{i,j}^n,$$

$$\bar{v}_{xi,j} = \left\{ \frac{\bar{\sigma}_{0i+1,j} - \bar{\sigma}_{0i-1,j}}{2\Delta \bar{x}} + \frac{1}{6\lambda \Delta \bar{x}^2} (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) (\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) + \frac{\psi_{i,j}}{3\lambda} \left[2 \frac{\bar{v}_{xi+1,j} + \bar{v}_{xi-1,j}}{\Delta \bar{x}^2} + \frac{\bar{v}_{xi,j+1} + \bar{v}_{xi,j-1}}{\Delta \bar{z}^2} + \frac{1}{4\Delta \bar{x} \Delta \bar{z}} (\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - \bar{v}_{zi+1,j-1} + \bar{v}_{zi-1,j-1}) \right] \right\} / \left[\frac{2}{3\lambda} \psi_{i,j} \left(\frac{2}{\Delta \bar{x}^2} + \frac{1}{\Delta \bar{z}^2} \right) \right]$$
(25)

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta\bar{x}} \right) \left(\frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta\bar{z}^2} - \frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta\bar{x}^2} \right) + \\
& \frac{1}{2\Delta\bar{x}^2 \Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) (\psi_{i+1,j+1} - \psi_{i+1,j-1} - \psi_{i-1,j+1} + \psi_{i-1,j-1}) + \\
& \psi_{i,j} \left[\frac{\bar{v}_{xi,j+2} - 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} - \bar{v}_{xi,j-2}}{2\Delta\bar{z}^3} - \frac{\bar{v}_{zi+2,j} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} - \bar{v}_{zi-2,j}}{2\Delta\bar{x}^3} + \right. \\
& \left. \frac{\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} + \bar{v}_{zi+1,j-1} - \bar{v}_{zi-1,j-1}}{2\Delta\bar{x}\Delta\bar{z}^2} + \frac{3}{2\Delta\bar{x}^2 \Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j+1} - \bar{v}_{xi+1,j-1} - \right. \\
& \left. 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} + \bar{v}_{xi-1,j+1} - \bar{v}_{xi-1,j-1}) \right] = 0
\end{aligned}$$

Граничные условия: $\bar{v}_{xi,j} = 0; \bar{v}_{zi,j} = 0; (i = 1, 2, \dots, m; j = 1)$

$$\bar{v}_{xi,j} = \bar{v}_0 - \cos \alpha_i, \bar{v}_{zi,j} = \sin \alpha_i; (i, j \in L), \quad \int \sigma_x dl = 0; (i = 1, j \in [1, \dots, n])$$

Рассмотрены вопросы сходимости, аппроксимации и устойчивости разностной схемы.

В четвертом разделе диссертации рассматривается экспериментальное исследование возможности восстановления плоских поверхностей наплавкой. Как было отмечено в первом разделе, при восстановлении изношенных деталей наплавкой стремятся получить такие поверхности, износостойкость которых была бы не меньше, чем у новых деталей. Однако это не всегда возможно, особенно при восстановлении наплавкой высокоуглеродистых и высокопрочных сталей. Получить сварное соединение, равнопрочное бездефектному основному металлу, к тому же имеющее высокую износостойкость, иногда не удается.

Существует множество путей, позволяющих избежать появления в сварном соединении дефектов типа трещин (предварительный подогрев, послесварочная термообработка и др.). Однако часто, несмотря на предпринимаемые усилия, в сварном соединении все же остаются дефекты или очаги их возникновения. После сварки-наплавки часто используют различные способы снятия сварочных напряжений и деформаций, которые в то же время упрочняют поверхность наплавленного металла.

В этом разделе диссертации также рассматриваются пути уменьшения до минимума размеров, количества дефектов типа трещин в сварном соединении при восстановлении поверхностей наплавкой, или пути устранения очагов возникновения этих дефектов посредством пластичекого деформирования.

Для исследований была подобрана сталь 45 и сталь 60. При восстановлении наплавкой для экспериментальных исследований была выбрана сварка под слоем флюса, как наилучший способ получения качественного наплавленного металла. Сварочные материалы – проволока Св-08ХГ2СМФ и флюс АН-348А, были подобраны с учетом возможности получения соответствующей износостойкости и сопротивляемости образованию дефектов. В процессе исследования были установлены оптимальные режимы и технология сварки, в соответствии с которой предусматривалось перекрывать каждым последующим валиком предыдущий хотя бы наполовину, с целью уменьшения доли

основного металла в наплавленном и этим повышения сопротивления трещинообразованию.

Образцы наплавлились в один или в два слоя (рис.8,9). В случае двухслойного наплавленного металла количество и размеры трещин были намного меньше, чем однослойного (рис.10,11) и поверхность наплавленного металла была более равномерной.



Рис.8 Первый слой наплавленного металла



Рис.9 Второй слой наплавленной поверхности



Рис.10. Количество трещин и их размеры при однослойной наплавке стали.



Рис.11. Количество трещин и их размеры при двухслойной наплавке стали.

В тех местах наплавленного металла, где образовались трещины, были вырезаны образцы разных размеров для последующей пластической деформации. Для металлографических исследований образцы протравливались 4%-ой азотной кислотой.

Подготовленные образцы нагревались в печи до температуры фазовых превращений 650-700⁰С и наплавленные поверхности были пластически обработаны молотом на наковальне. Как показали эксперименты, трещины полностью исчезали на некоторых наплавленных образцах.

На однослойных и двухслойных образцах, где количество проходов превышало восемь, трещины были устранены не полностью из-за больших размеров образцов и уменьшения температуры до 200⁰С. Однако их количество значительно уменьшилось. После этого эксперименты были продолжены на лабораторном прокатном стане.

Результаты экспериментов показали, что на всех подготовленных нами образцах после пластической деформации трещины были устранены (рис.12).



Рис.12 Образец без трещин после пластической деформации

Микроструктура первого слоя наплавленного металла – троостит, легированный ферритом, второго слоя – сорбит с коагулированным цементитом твердостью 285-330 HV, а структура околосшовной зоны – бейнит с пластическим сорбитом твердостью 290-340 HV. На некоторых участках наблюдалась мартенситная структура.

Полученные результаты показали, что в образцах, нагреваемых до температурного интервала 650-700⁰С и обработанных пластическим деформированием на прокатном стане, трещины полностью были устранены. Структура их поверхностного слоя благоприятная. Твердость наплавленного металла показала, что его износостойкость гораздо выше, чем у стали 60. Что же касается образцов, обработанных молотом, то в них устранение трещин зависит от площади наплавленного металла (от размеров образца).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Изучена одномерная задача пластического деформирования наплавленного слоя на плоской поверхности при обкатке цилиндрическим роликом, с учетом закона трения Кулона на поверхности контакта. Уравнение состояния материала выбрано на основе теории ползучести (теории упрочнения).
2. Разработана прикладная программа в математическом редакторе Mathcad для численного анализа нелинейной одномерной задачи.
3. Расчетами установлено, что напряженно-деформированное состояние в очаге деформации существенно зависит от величины λ ($\lambda = h_0 / R; h_0, R$ - толщина слоя до деформации и радиус ролика, соответственно) и от коэффициента трения μ на поверхности контакта материала с роликом.
4. Установлено, что при определенных значениях λ силы трения меняют направление на малом участке поверхности контакта. Контактное давление принимает максимальное значение в точке поверхности контакта с угловой координатой $\alpha = 0,05$, а затем уменьшается. При значениях $\lambda = 0,5$ и $\mu = 0,3$ нормальное напряжение в направлении обкатки существенно уменьшается и фактически равняется нулю.
5. Сформулирована двумерная задача неупругого деформирования наплавленного слоя при обкатке. Получена замкнутая система нелинейных дифференциальных уравнений на основе теории упрочнения и записаны граничные условия;
6. Для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных предложен метод сеток. Система дифференциальных уравнений и граничные условия записаны в конечных разностях. Граничные условия вблизи криволинейной поверхности контакта записаны с использованием линейной интерполяции.
7. Установлено, что количество и размеры трещин наплавленного металла зависят от доли участия основного металла в наплавленном и от химического состава металла.
8. Оптимальная температура нагрева для посленаплавочной пластической деформации находится в интервале $650-700^{\circ}\text{C}$, что дает возможность устранить дефекты сварного соединения и наплавленного металла. Увеличивается прочность (износостойкость) наплавленного металла.
9. Установлено, что вероятность устранения трещин в наплавленном металле в процессе пластического деформирования зависит от площади наплавленного металла, вида обработки и снижется с понижением температуры.
10. Разработанная методика расчета наплавленного слоя, может быть использована для определения параметров технологического процесса при восстановлении плоских поверхностей.

Основные положения диссертационной работы отражены в трудах

1. Киквидзе О.Г., Тулеугалиева Г.Б., Булекбаева Г.Ж., Бекенова А., Билашова Г. Расчет граничного слоя при пластическом деформировании поверхностей. //Georgian Engineering News, №4 (Vol. 60).-2011.-pp.51-55.
2. Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г., Кипиани П.Н., Миндадзе С.О. Пластическая деформация как средство для устранения дефектов типа трещин в сварных соединениях. //Kutaisi. BULLETIN OF AKAKI TSERETELI STATE UNIVERSITY №1().- 2016.-pp.
3. Киквидзе О.Г., Булекбаева Г.Ж., Кипиани П.Н. Пластическое деформирование наплавленного слоя на плоской поверхности. //Georgian Engineering News, №1 (Vol.).-2016.-pp.
4. Кипиани П.Н., Миндадзе С.О., Булекбаева Г.Ж. Разработка энергосберегающей технологии с применением послесварочной пластической деформации при сварке и наплавке высокопрочных сталей. // Междунар. науч. конф.: «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития», 24-25.10.2015. – Кутаиси, 2015, с.234-236.

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ბულეკბაევა გულმირა

დეტალის ბრტყელ ზედაპირზე დადუღებული ფენის

პლასტიკური დეფორმირება

0408 - ინჟინერიის მექანიკა და ტექნოლოგია

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი 2016

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი ო.კიკვიძე

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი პ.ყიფიანი

ოფიციალური რეცენზენტები:

დაცვა შედგება _____ 2016 წ. 14 სთ. საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის
სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილი სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე.

მისამართი: 4600 ქ.ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. №59, I კორპუსი, აუდ. № 1114

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკ.წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
ბიბლიოთეკაში. მისამართი: ქ.ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. №59

ავტორეფერატი დაგზავნილია «_____» _____ 2016 წ.

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

ასოცირებული პროფესორი

/ნ. სახანბერიძე/

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. მანქანათმშენებლობის წარმოების უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს მანქანათა ნაწილების საიმედოობისა და ხანგამძლეობის ამაღლება. ამ საკითხების გადაწყვეტა უშუალოდაა დამოკიდებული დეტალების ხარისხის გაუმჯობესების და მათი ცვეთამედეგობის გადიდების, თვითღირებულების შემცირების, მწარმოებლურობის ზრდის და შრომის პირობების გაუმჯობესების პროგრესული რესურსდამზოგი ტექნოლოგიური მეთოდების შექმნასა და ათვისებაზე.

დადულებით ღებულობენ ცვეთამედეგობის, მხურვალმედეგობის, ანტიფრიფციული, მჟავაგამძლეობის და სხვა მსგავსი თვისებების მქონე ნაკეთობებს. თუ კი მანქანათმშენებელ წარმოებაში დადულება გამოიყენება მოხახუნე ზედაპირების ცვეთამედეგობის ასამაღლებლად, რადგან ის საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვანად გაიზარდოს დეტალების სამსახურის ვადა და შემცირდეს მათ დამზადებაზე საჭირო დეფიციტური მასალების ხარჯი, სარემონტო წარმოებაში დადულება ძირითადად გამოიყენება გაცვეთილი ელემენტების განლაგების, ფორმისა და ზომების შემდგომი აღდგენითი სამუშაოების ჩასატარებლად.

დადულების თანამედროვე მეთოდების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დადულებული ლითონისათვის დამახასიათებელია რიგი ფაქტორებისა, რომლებიც კომპლექსში იწვევენ დეტალებზე დატანილი ლითონური საფარის ცვეთამედეგობის მნიშვნელოვან შემცირებას. ეს ფაქტორებია: მექანიკური თვისებების მნიშვნელოვანი გაფანტვა; ჩანართებისა და მეტალურგიული დეფექტების არსებობა; დეტალების სტრუქტურის არაერთგვაროვნება და მათ სიგრძეზე ზედაპირული სისალის არათანაბრობა; არახელსაყრელი გამჭიმი ძაბვების არსებობა; დადულებული დეტალების დადლილობითი სიმტკიცის შემცირება; მექანიკური დამუშავების სირთულე.

აღდგენილი დეტალების ლითონის საფარის ხარისხის და ცვეთამედეგობის ამაღლება მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს მანქანათმშენებლობის სარემონტო საწარმოებში. დეტალების ცვეთამედეგობის ამაღლება, გარკვეულწილად, მანქანების ხანგამძლეობის ამაღლების ამოცანის გადაწყვეტის საშუალებას იძლევა.

დადულების ტექნოლოგიური პროცესის ერთ-ერთ ეტაპს წარმოადგენს ზედაპირული პლასტიკური დეფორმირება. ზედაპირული პლასტიკური დეფორმირება - ეს არის განმამტკიცებელი დამუშავების სახეობა, რომლის დროსაც არ წარმოიქმნება ბურბუშელა და ხდება ნამზადის თხელი ზედაპირული ფენის პლასტიკური დეფორმირება, და მანქანების ლითონური დეტალების მზიდი უნარის ამაღლების ეფექტური ხერხი. ზედაპირული პლასტიკური დეფორმირების გამოყენება საშუალებას იძლევა ეფექტური გავლენა მოვახდინოთ დეტალების ხანგამძლეობის ამაღლებაზე, რომლებიც მუშაობენ ციკლური დატვირთვების,

ხახუნისა და კოროზიული გარემოების ზემოქმედების პირობებში და რომლებსაც აქვთ ძაბვათა კონცენტრატორები .

ნაშრომის მიზანი. დადუღებული ფენის პლასტიკური დეფორმირების კვლევის თეორიული და ექსპერიმენტალური მეთოდების დამუშავება, დეტალების ბრტყელი ზედაპირების აღდგენისას.

ნაშრომის ძირითადი ამოცანები. მიზნის მიღწევისათვის დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები: 1. ცოცვადობის - განმტკიცების ტექნიკური თეორიის საფუძველზე შერჩეულია ამაღლებულ ტემპერატურებზე მასალის მდგომარეობის განტოლება; 2. ჩამოყალიბებულია დადუღებული ფენის ცილინდრული გორგოლაჭით გრძივი მოგორვის ერთგანზომილებიანი ამოცანა, მასალის გორგოლაჭთან კონტაქტის ზედაპირზე კულონის ხახუნის კანონის გათვალისწინებით, და განმტკიცების თეორიის საფუძველზე მიღებულია ფორმულები დეფორმაციის კერაში დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გაანგარიშებისათვის; 3. ჩატარებულია ერთგანზომილებიანი არაწრფივი ამოცანის რიცხვითი ამოხსნა და განისაზღვრა ძაბვათა კომპონენტები, ტექნოლოგიური პროცესის ძალოვანი ფაქტორები Mathcad-ის მათემატიკური რედაქტორის გამოყენებით; 4. განმტკიცების თეორიის საფუძველზე ჩამოყალიბებულია დადუღებული ფენის გრძივი მოგორვის ორგანზომილებიანი ამოცანა, მიღებულია კერძო წარმოებულებიანი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ჩაკეტილი სისტემა და ჩაწერილია სასაზღვრო პირობები; 5. სასრულ სხვაობათა მეთოდით დამუშავებულია კერძო წარმოებულებიანი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის ალგორითმი; 6. ჩატარებულია ბრტყელი ზედაპირის აღდგენისას დადუღებული ფენის ხარისხის ექსპერიმენტალური კვლევა.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება. განმტკიცების თეორიის საფუძველზე დამუშავებულია გრძივი მოგორვისას დადუღებული ფენის პლასტიკური დეფორმირების არაწრფივი ამოცანების გაანგარიშების მეთოდები. განმტკიცების თეორია აღწერს ფართო კლასის ლითონური მასალების მდგომარეობას ფართო ტემპერატურულ ინტერვალში. დამუშავებულია გამოყენებითი პროგრამა Mathcad-ის სისტემაში დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის და ტექნოლოგიური პროცესის ძალოვანი პარამეტრების გაანგარიშებისათვის, რაც რთული საინჟინრო გაანგარიშებების გამარტივებისა და ავტომატიზირების საშუალებას იძლევა. მოცემულია ბრტყელ ზედაპირზე ფენის დადუღების ტექნოლოგიური პროცესის ექსპერიმენტალური კვლევის მეთოდიკა.

მიღებული შედეგები და დამუშავებული მეთოდები შეიძლება გამოყენებული იქნას მანქანათმშენებლობის საწარმოთა პრაქტიკოს სპეციალისტების მიერ ტექნოლოგიური პროცესის პარამეტრების გაანგარიშებისათვის დეტალების დაზიანებული ზედაპირების აღდგენისას. დამუშავებული მეთოდიკები შეიძლება

გამოყენებული იქნას მაღალი კურსის სტუდენტებისა და მაგისტრანტების სწავლის პროცესში.

დაცვაზე გამოტანილი დებულებები. 1. დადუღებული ფენის გრძივი მოგორვის ერთგანზომილებიანი ამოცანის გაანგარიშების მეთოდიკა, განმტკიცების თეორიის საფუძველზე; 2. დეფორმაციის კერაში ძაბვების კომპონენტებისა და ტექნოლოგიური პროცესის ძალოვანი ფაქტორების გაანგარიშება Mathcad-ის სისტემაში; 3. სასრულ სხვაობათა მეთოდით გრძივი მოგორვის ორგანზომილებიანი ამოცანის გაანგარიშების მეთოდიკა; 4. ბრტყელ ზედაპირზე დადუღების ტექნოლოგიური პროცესის ექსპერიმენტალური კვლევის მეთოდიკა; 5. დადუღებული ფენის ხარისხის შეფასების მეთოდიკა.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები და შედეგები მოხსენებული იქნა საერთაშორისო კონფერენციაზე III International Scientific Conference ENERGY:REGIONAL PROBLEMS AND DEVELOPMENT OPPORTUNITIES (Kutaisi 2015წ.), აკ.წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მექანიკა-მანქანათმშენებლობის დეპარტამენტის სამეცნიერო სემინარებზე (2014წ., 2015წ., 2016წ.).

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო ნაშრომი.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლისაგან, ოთხი ნაწილისაგან, ძირითადი შედეგებისა და დასკვნებისაგან, ლიტერატურის ჩამონათვალისა და დანართებისაგან. დაბეჭდილია კომპიუტერზე. ნაშრომი დაბეჭდილია 101 გვერდზე და შეიცავს 31 ნახაზს, 3 ცხრილს და 1 დანართს. ლიტერატურის ჩამონათვალი მოიცავს 75 დასახელებას.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია დისერტაციის თემის აქტუალობა, ფორმულირებულია ნაშრომის მიზანი და მისი პრაქტიკული ღირებულება.

პირველ ნაწილში მოცემულია დეტალების დაზიანებული ზედაპირების აღდგენისათვის დადუღების ტექნოლოგიის მოკლე აღწერა და მოცემულია დადუღების მეთოდების კლასიფიკაცია. განხილულია საშემდუღებლო მასალების შერჩევის საკითხი, რომლებიც გამოიყენება აღსადგენი დეტალების დადუღებისას, საჭირო ხარისხის დადუღებული ფენის მისაღებად. ხარისხიანი ფენის მიღების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მომენტს წარმოადგენს ბზარის ტიპის დეფექტების და ზედაპირის უსწორობების თავიდან აცილება. წარმოდგენილია ცივი და ცხელი ბზარების ტიპის დეფექტების წარმოქმნის თავიდან აცილების გზები.

დადუღებული ფენის ხარისხის გაუმჯობესებისათვის გამოიყენებენ პლასტიკურ დეფორმირებას გადიდებულ ტემპერატურებზე. თერმომექანიკური

დამუშავების ერთ-ერთ მეთოდს წარმოადგენს დადუღებული ფენის გრძივი მოგორვა ხისტი ცილინდრული გორგოლაჭით. ტექნოლოგიური პროცესის განხორციელება დამოკიდებულია დეფორმირების ტემპერატურის შერჩევაზე და ფორმის ცვლილების ძალოვანი პარამეტრების ცოდნაზე.

ვ.ი.მახნენკოს, ა.ა.ორლოვის, ნ.ი.ბოიკოს ნაშრომებზე დაყრდნობით, ნ.ნ.რიკალინის ცნობილი მეთოდური მიდგომების საფუძველზე, მიღებულია რიგი ამონახსნებისა, რომელთა მეშვეობით შესაძლებელია პლასტიკური დეფორმაციის ზონებში დადუღებული ლითონის ტემპერატურის განსაზღვრა. დეფორმაციის ზონაში დადუღებული ლილვაკის ტემპერატურა განისაზღვრება საყოველთაოდ ცნობილი ა.ა.ორლოვის განტოლების მიხედვით, სქელკედლიანი ან მთლიანი ცილინდრების დადუღებასთან მისადაგებით. დეტალის დეფორმაციის ზონაში დადუღებული ლითონის ნებისმიერი წერტილის ტემპერატურა, სითბოს წყაროს მოქმედების შეწყვეტისთანავე, განისაზღვრება ნ.ნ.რიკალინის ფორმულით.

ლითონების დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესების გაანგარიშების ამოცანების გადაწყვეტა ჩვეულებრივ ხდება პლასტიკურობის თეორიაში მიღებული ერთ-ერთი სხეულის მოდელის საფუძველზე (უფრო ხშირად, ხისტი - იდეალურად პლასტიკური, ზოგჯერ დრეკადი - იდეალურად პლასტიკური ან ხისტ-განმტკიცებადი სხეულისა). დ.ხ.კასრამის ნაშრომში მოცემულია დეფორმირებისადმი წინააღმდეგობის გაანგარიშება დადუღებული ზადაპირების თერმომექანიკური დამუშავებისას. განხილულია დეფორმაციის კერაში ძაბვების განსაზღვრის ერთგანზომილებიანი ამოცანა ბრტყელი კვეთების ჰიპოთეზის საფუძველზე. ითვლება, რომ ნორმალური ძაბვები განივ კვეთში მუდმივია, დეფორმირებული მდგომარეობა ბრტყელია. დეფორმაციის კერაში პლასტიკურობის პირობა ჩაწერილია ე.წ. იძულებითი დენადობის ზღვრის გამოყენებით შემდეგი სახით $K = \beta \sigma_T$, აქ σ_T - საბაზო_დენადობის ზღვარია, $\beta = 1-1,5$ - ლოდეს კოეფიციენტი.

რადგან ასეთ შემთხვევაში მდგომარეობის განტოლებებში არ შედის დეფორმაციის სიჩქარეები, ეს ამონახსნები არ იძლევა საშუალებას ავსახოთ მადეფორმირებელი იარაღის მოძრაობის სიჩქარე დადუღებული ფენის ფორმის ცვლილების ძალვაზე და მის დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე.

ეს გავლენა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, თუ ლითონი დეფორმირდება მაღალ ტემპერატურებზე და ძაბვებზე. ასეთ შემთხვევაში, დეფორმირების შედარებით მცირე დროის მიუხედავად, არსებითი მნიშვნელობა აქვს ლითონის სიბლანტეს და ამიტომ ლითონების დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესების გაანგარიშებები უნდა ეფუძნებოდეს მდგომარეობის განტოლებებს, რომლებიც შეიცავენ დეფორმაციის სიჩქარეებს, ე.ი. განტოლებებს, რომლებიც ასახავენ ლითონების რეონომიულ თვისებებს - ცოცვადობის თეორიის განტოლებებს.

რეოლოგიური მოდელები ლითონების ფორმის პლასტიკური ცვლილების ტექნოლოგიური ამოცანების აღწერისათვის გამოყენებულია გ.გენკის, ა.ა.ილიუშინის,

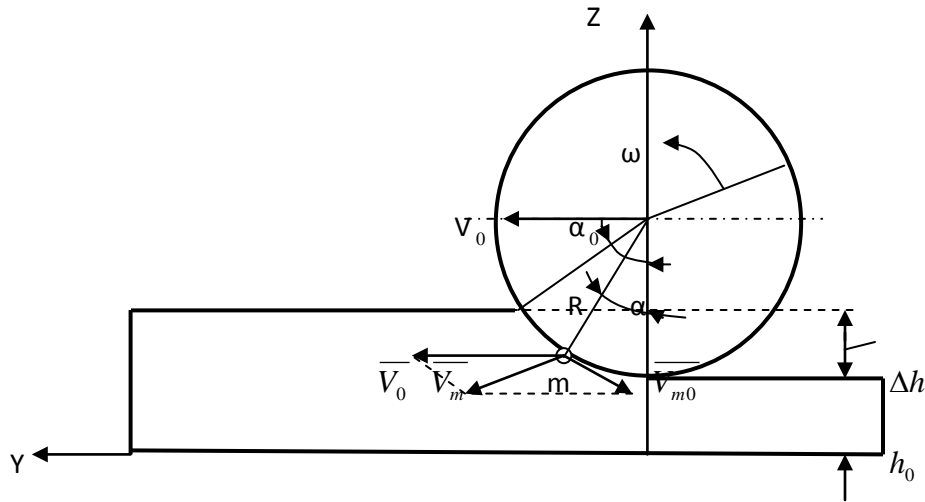
ა.ი.იშლინსკის, ნ.ნ.მალინინის, კ.ი.რომანოვის, ო.ზენკოვიჩის, ნ.კრისტესკუს, ს.ტანგას, დ.დურბანის და სხვათა ნაშრომებში.

მეორე ნაწილში განხილულია დადუღებული ფენის მოგორვის ერთგანზომილებიანი ამოცანა ცოცვადობის - განმტკიცების თეორიის საფუძველზე. მასალის მდგომარეობის განტოლება მიიღება შემდეგი სახით:

$$\sigma_e = a \xi_e^m \kappa^n \quad (1)$$

სადაც $\kappa = \int \xi_e dt$ - უდკვისტის პარამეტრია, σ_e - ექვივალენტური ძაბვაა, ξ_e - დეფორმაციის ექვივალენტური სიჩქარეა, a, m, n - მასალის მუდმივების განსაზღვრული ტემპერატურისას.

განხილულია მასალის დეფორმირება აბსოლუტურად ხისტი ცილინდრული სხეულის (გორგოლაჭის) ზემოქმედებით, რომელიც აწარმოებს ბრტყელპარალელურ მოძრაობას ნახაზის სიბრტყეში (ნახ.1). დეფორმირებადი მასალა იმყოფება ხისტ ზედაპირზე. აღვნიშნოთ გორგოლაჭის ცენტრის გადაადგილების სიჩქარე v_0 -ით, ხოლო ბრუნვის კუთხური სიჩქარე - ω -ით. ითვლება, რომ ისინი მუდმივი სიდიდეებია დროში.



ნახ.1 მოგორვის სქემა

R -გორგოლაჭის რადიუსი, Δh -ფენის სისქის ცვლილება, h_0 -გაგლინული (ნაგლინი) ფენის სისქე, α_0 - მაქსიმალური კონტაქტის კუთხე, α - m წერტილის კუთხური კოორდინატი, ω -გორგოლაჭის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე, \vec{V}_0 - გორგოლაჭის ცენტრის გადაადგილების სიჩქარის ვექტორი, \vec{V}_m -კონტაქტის ზედაპირზე m წერტილის გადაადგილების სიჩქარის ვექტორი, \vec{V}_{m0} -გორგოლაჭის ცენტრის მიმართ m წერტილის ბრუნვის სიჩქარის ვექტორი.

დეფორმაციის კერაში მასალის გორგოლაქთან კონტაქტის ზედაპირზე ნებისმიერი წერტილის გადაადგილების სიჩქარის კომპონენტები ნაჩვენებია ნახ.1-ზე:

$$v_y = v_0 - \omega R \cos \alpha; v_z = -\omega R \sin \alpha. \quad (2)$$

ნავარაუდევია, რომ მასალის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა იცვლება მხოლოდ y კოორდინატის მიმართ. მაშინ ელემენტარული მოცულობის წონასწორობის განტოლებას აქვს სახე:

$$\frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{\sigma_y + p}{h} \operatorname{tg} \alpha + \frac{q - q_1}{h} = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_z = p - q \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

სადაც σ_y, σ_z - ძაბვების კომპონენტებია, p, q - შესაბამისად, ხახუნის ძალების წნევა და ინტენსივობაა მასალის გორგოლაქთან კონტაქტის ზედაპირზე, q_1 - მასალის ხისტ ზედაპირთან ხახუნის ძალთა ინტენსივობაა.

ექვივალენტური ძაბვა σ_e მიახლოებით გაიანგარიშება როგორც:

$$\sigma_e = \sigma_y - \sigma_z. \quad (5)$$

ამოხსნის გამარტივებისათვის მიიღება, რომ მასალის გორგოლაქთან კონტაქტის ზედაპირზე ხახუნი ემორჩილება კულონის კანონს $q = \mu p$, ამასთან, პროპორციულობის კოეფიციენტი μ მუდმივია კონტაქტის მთელს ზედაპირზე. მასალის ხისტ ზედაპირთან კონტაქტის ზედაპირზე ხახუნის ძალთა ინტენსივობა მიიღება როგორც მაქსიმალური მხევი ძაბვის პროპორციული

$$q_1 = \chi \tau_{\max} = \chi (\sigma_y - \sigma_z) / 2 = \chi \sigma_e / 2, \quad (6)$$

სადაც χ - მუდმივი პროპორციულობის კოეფიციენტია. როცა $\chi = 1$, ადგილი აქვს მიწებებს.

მარტივი გარდაქმნების შემდეგ დიფერენციალური განტოლება (3) წარმოდგენილია სახით:

$$\frac{d\sigma_y}{d\alpha} + \psi_1(\alpha) \sigma_y = \psi_2(\alpha), \quad (7)$$

სადაც შემოღებულია აღნიშვნები:

$$\begin{aligned}\psi_1(\alpha) &= \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\sin \alpha + \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \right), \\ \psi_2(\alpha) &= \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} + \frac{\chi}{2} \cos \alpha \right) \sigma_e.\end{aligned}\quad (8)$$

(7) განტოლების ინტეგრირებისათვის გვაქვს სასაზღვრო პირობა: $\alpha = 0, \sigma_y = 0$.
მაშინ განტოლების ამონახსნი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\sigma_y = \exp\left(-\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) \int_0^\alpha \psi_2 \exp\left(\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) d\alpha. \quad (9)$$

გრძივი მიმართულებით დეფორმაციის სიჩქარისათვის და დეფორმაციის ექვივალენტური სიჩქარისათვის გვაქვს:

$$\xi_y = \omega \operatorname{tg} \alpha, \xi_e = 2\omega \operatorname{tg} \alpha / \sqrt{3}. \quad (10)$$

უდკვისტის პარამეტრს, $dt = d\alpha/\omega$. თანაფარდობის გათვალისწინებით, აქვს სახე: $\kappa = -2 \ln|\cos \alpha|/\sqrt{3}$. ასეთ შემთხვევაში ექვივალენტური ძაბვა გაიანგარიშება ფორმულით:

$$\sigma_e = a(2/\sqrt{3})^{m+n} \omega^m \operatorname{tg}^m \alpha (-\ln|\cos \alpha|)^n.$$

წნევა მასალის გორგოლაქთან კონტაქტის ზედაპირზე განისაზღვრება თანაფარდობით: $p = (\sigma_y - \sigma_e)/(1 - \mu \operatorname{tg} \alpha)$. დეფორმაცია განივი მიმართულებით ტოლია:

$$\varepsilon_y = \int_0^t \xi_y dt + \varepsilon_y^0 = -\ln|\cos \alpha| + \varepsilon_y^0. \quad (11)$$

აქ ε_y^0 – ნარჩენი დეფორმაციაა დადულების შემდეგ.

იმისათვის, რომ მთლიანად აღმოვფხვრათ ნარჩენი გრძივი დეფორმაციები, საჭიროა პირობის $\ln|\cos \alpha| = \varepsilon_y^0$ შესრულება. შესაბამისი კონტაქტის კუთხე:

$$\alpha_0 = \arccos[\exp(\varepsilon_y^0)]. \quad (12)$$

მეორეს მხრივ, მაქსიმალური კონტაქტის კუთხე (ნახ.1):

$$\alpha_0 = \arcsin\left[2\sqrt{\Delta h/(2R)}\right], \quad (13)$$

სადაც Δh – ფენის სისქის შემცირებაა.

(12) და (13) ფორმულების შედარებისას ვპოულობთ:

$$\Delta h = R[1 - \exp(2\varepsilon_y^0)]/2 . \quad (14)$$

თუ ცნობილია ნარჩენი გრძივი შედუღების დეფორმაციის სიდიდე, მაშინ (12) და (14) ფორმულებით განისაზღვრება მასალის გორგოლაჭთან კონტაქტის მაქსიმალური კუთხე და დეფორმაცია $\varepsilon_z = \Delta h/h$ ელემენტის სისქეზე ფენის მოგორვის ზონაში.

ძალთა მომენტი სიგრძის ერთეულზე, ნახაზის მიმართ პერპენდიკულარული მიმართულებით, იმის ვარაუდით, რომ საკონტაქტო წნევების ძალთა მომენტი გორგოლაჭის ცენტრის მიმართ შეიძლება უგულებელვყოთ, ტოლია:

$$M = \mu R^2 \int_0^{\alpha_0} p d\alpha .$$

სიგრძის ერთეულზე მოქმედი ძალის პროექცია ვერტიკალურ ღერძზე ნახაზის მიმართ პერპენდიკულარული მიმართულებით:

$$P_z = R \int_0^{\alpha_0} (p \cos \alpha - q \sin \alpha) d\alpha .$$

სიგრძის ერთეულზე მოქმედი ძალის პროექცია ჰორიზონტალურ ღერძზე ნახაზის მიმართ პერპენდიკულარული მიმართულებით:

$$P_y = R \int_0^{\alpha_0} (p \sin \alpha + q \cos \alpha) d\alpha .$$

ზემოთ მიღებულ ფორმულებში ხდება ინტეგრალების რიცხვითი გაანგარიშება. ამისათვის შემოღებულია უგანზომილებო სიდიდეები:

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e}{a\omega^m}, \bar{\sigma}_{y,z} = \frac{\sigma_{y,z}}{a\omega^m}, \bar{p} = \frac{p}{a\omega^m}, \bar{M} = \frac{M}{a\omega^m R^2}, \bar{P}_{y,z} = \frac{P_{y,z}}{a\omega^m R}, \bar{q} = \frac{q}{a\omega^m}, \bar{v}_{y,z} = \frac{v_{y,z}}{\omega R},$$

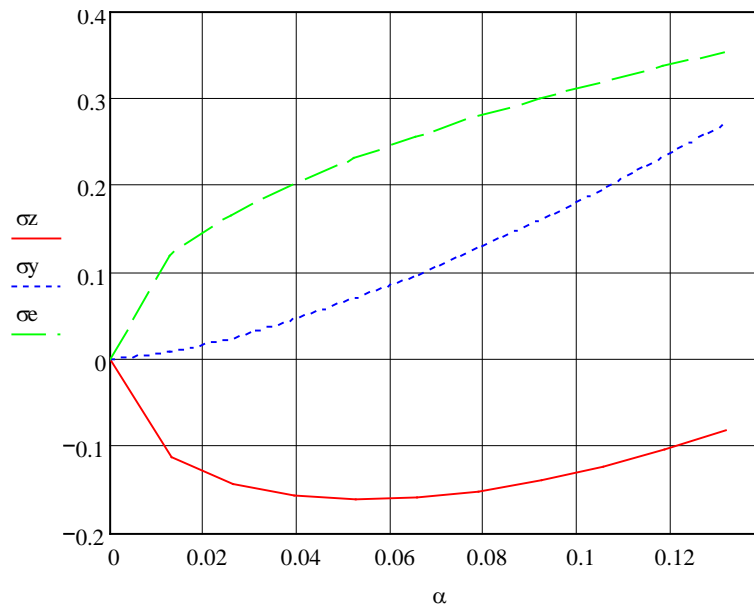
$$\bar{\psi}_2(\alpha) = \psi_2(\alpha)/(a\omega^m), \bar{\xi}_{e,y} = \frac{\xi_{e,y}}{\omega}, \bar{\Delta h} = \frac{\Delta h}{R}, \lambda = \frac{h_0}{R} .$$

სამაგალითოდ, ჩატარებული იქნა მასალის დეფორმირების გაანგარიშება მუდმივების შემდეგ მნიშვნელობებისათვის:
 $m = 0,147; n = 0,157; \mu = 0,3; \chi = 1; h_0 / R = 0,1$. ნარჩენი დეფორმაციის სიდიდე მიიღებოდა $\varepsilon_y^0 = -8,7 \cdot 10^{-3}$. სიდიდე $\Delta h / R = 8,7 \times 10^{-3}$. ნახ.2-ზე ნაჩვენებია

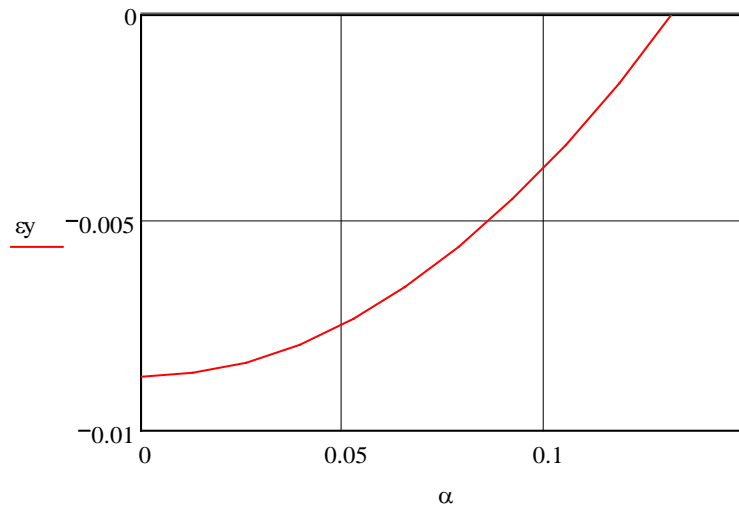
დეფორმაციის კერაში დაბრუნებისა და ექვივალენტური დაბრუნების კომპონენტების უგანზომილებო სიდიდეების განაწილება. როგორც ნახ.2-დან ჩანს, ღერძული მიმართულებით ზაბრუნები დადებითია, ამიტომ ნარჩენი გამჭიმვი დაბრუნები შედუღების შემდეგ გაიზრდება ნაკერის მოგორვისას.

ნახ.3-ზე ნაჩვენებია ნარჩენი დეფორმაციის ცვლილება გრძივი მიმართულებით, ხოლო ნახ.4-ზე - კონტაქტური წნევის უგანზომილებო სიდიდის განაწილება. გორგოლაჭზე მოქმედი ძალოვანი ფაქტორების სიდიდეები ტოლია: $\bar{P}_y = 4.1 \times 10^{-3}$, $\bar{P}_z = 0.011$, $\bar{M} = 3.4 \times 10^{-3}$. ნახ.5-ზე მოცემულია ძალებისა და მომენტის უგანზომილებო მნიშვნელობების ცვლილების გრაფიკები კონტაქტის კუთხის მიხედვით. ამ გრაფიკებით შეიძლება დავადგინოთ დეფორმირების ძალებისა და მომენტის მნიშვნელობები და განვსაზღვროთ ტექნოლოგიური მოწყობილობის საჭირო სიმძლავრე.

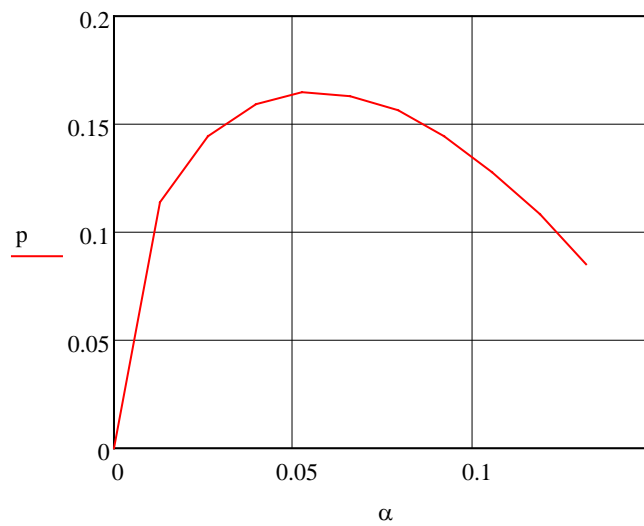
განგარიშება გვიჩვენებს, რომ შეიძლება შეირჩეს პარამეტრები μ და λ ისე, რომ მნიშვნელოვნად იქნას შემცირებული დაბრუნები y ღერძის მიმართულებით (ნახ.6). λ -ს განსაზღვრული მნიშვნელობებისას, q ხახუნის ძალები იცვლიან მიმართულებას კონტაქტის ზედაპირის მცირე უბანზე.



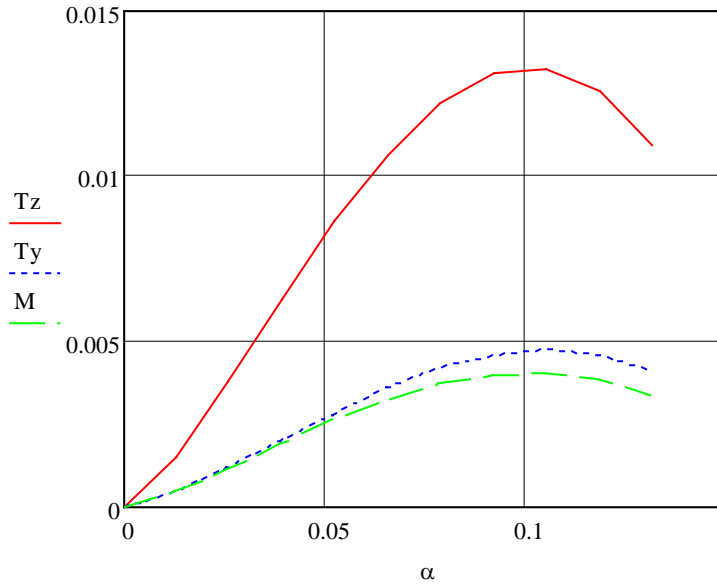
ნახ.2 დეფორმაციის კერაში დაბრუნების კომპონენტების და ექვივალენტური დაბრუნების განაწილება



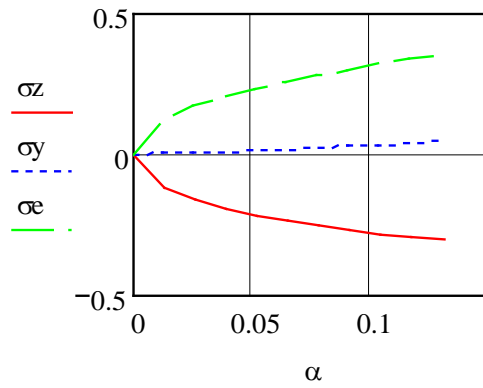
ნახ.3 ნარჩენი დეფორმაციის ცვლილება ფენის ღერძული მიმართულებით



ნახ.4 გორგოლაქზე კონტაქტური წნევის განაწილება



ნახ.5 გორგოლაქზე მოქმედი ძალები და მომენტი



ნახ.6 დეფორმაციის კერაში ძაბვებისა და ექვივალენტური

ძაბვის კომპონენტების განაწილება

მნიშვნელობებისათვის: $\mu=0,3$; $\lambda=0,5$.

ამრიგად, ერთგანზომილებიანი ამოცანის შემთხვევაში მიღებულია შედარებით ზოგადი ფორმულები კონტაქტის ზედაპირზე დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის, წნევისა და ხახუნის ძალების, გორგოლაჭზე მოქმედი ძალებისა და მომენტის გაანგარიშებისათვის.

მესამე ნაწილში განიხილება დადუღებული ფენის პლასტიკური დეფორმირების ორგანზომილებიანი ამოცანა ცილინდრული გორგოლაჭით მოგორვისას, რომელიც ასრულებს ბრტყელპარალელურ მოძრაობას (x, z) სიბრტყეში. გამოიყენება მართკუთხა კოორდინატთა სისტემა x, y, z . განიხილება ბრტყელი დეფორმირება და ითვლება, რომ დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა არ არის დამოკიდებული y კოორდინატზე. გადაადგილებათა სიჩქარეების კომპონენტები დეფორმაციის კერაში: $v_z = v_z(x, z), v_x = v_x(x, z), v_y = 0$. ძაბვების ტენზორის კომპონენტები $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, z); i, j = x, y, z; \tau_{zy} = 0, \tau_{xy} = 0$. როგორც სრული დეფორმაციები მიიღება ცოცვადობის დეფორმაციები.

განსახილველ შემთხვევაში დეფორმაციების სიჩქარეების კომპონენტები გაიანგარიშება ფორმულებით:

$$\xi_x = \partial v_x / \partial x, \xi_z = \partial v_z / \partial z, \xi_y = 0, \eta_{xz} = \partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x . \quad (15)$$

მასალის უკუმშველობის პირობას აქვს სახე:

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_z / \partial z = 0 . \quad (16)$$

ექვივალენტური დეფორმაციის სიჩქარე და უდკვისტის პარამეტრები ტოლია:

$$\xi_e = 2 / \sqrt{3} \sqrt{(\partial v_x / \partial x)^2 + (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x)^2 / 4} , \quad \kappa = \int \xi_e / v_x dx . \quad (17)$$

ძაბვების ტენზორის კომპონენტები გაიანგარიშება სენ-ვენან-ლევე-მიზესის დამოკიდებულებებით: $\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + 2\sigma_e \xi_{ij} / (3\xi_e)$, სადაც: σ_0 – საშუალო ძაბვაა $\sigma_0 = \sigma_{ii} / 3; \delta_{ij}$ – კრონეკერის სიმბოლო.

წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებებს აქვს სახე:

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial^3 v_x}{\partial z^3} + \frac{\partial^3 v_z}{\partial x \partial z^2} - \frac{\partial^3 v_x}{\partial x^2 \partial z} - \frac{\partial^3 v_z}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^3 v_x}{\partial z \partial x^2} \right) - \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + 4 \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = 0$$

მე (18) სისტემაში შემავალი განტოლებები, (1) მდგომარეობის განტოლების, (17) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით, წარმოადგენენ არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებებს კერძო წარმოებულებში, გადაადგილების სიჩქარეებისა და საშუალო ნორმალური ძაბვის მიმართ.

დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრირებისათვის გვაქვს სასაზღვრო პირობები: $z = 0, v_z = 0; v_x = 0$. მასალის გორგოლაჰთან კონტაქტის ზედაპირზე გადაადგილების სიჩქარეები ტოლია: $(z, x) \in L; v_z = \omega R \sin \alpha, v_x = v_0 - \omega R \cos \alpha$, სადაც L - წრეწირის რკალია ცენტრალური კუთხით α_0 , $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$; R - გორგოლაჰის რადიუსია. გვერდით ზედაპირზე $x = 0, x = a$ გვაქვს პირობა - x , ღერძის მიმართულებით ჯამური ძალის ნულის ტოლობა $\int \sigma_x dz = 0$.

სასაზღვრო პირობების მქონე კერძო წარმოებულებიანი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრირება, უნდა ვაწარმოოთ რიცხვითი მეთოდებით. ფართოდაა გავრცელებული სხვაობების მეთოდები. გამოიყენება ცენტრალური სასრული სხვაობების სქემა იტერაციული პროცესის გამოყენებით. ვირჩევთ ნულოვან მიახლოებას გადაადგილების სიჩქარისათვის v_z (ან v_x), უკუმშველობის პირობიდან განისაზღვრება გადაადგილების სიჩქარე v_x (ან v_z), განვსაზღვრავთ ექვივალენტურ დეფორმაციის სიჩქარეს, უდკვისტის პარამეტრს და წონასწორობის განტოლებიდან ვპოულობთ საშუალო ნორმალურ ძაბვას და გადაადგილების სიჩქარეს v_z (ან v_x). იტერაციის ყოველ ბიჯზე ხდება გადაადგილების სიჩქარის მოცემული და მიღებული მნიშვნელობების შედარება.

ამოცანის რიცხვითი ამოხსნისათვის გამოიყენება ზემოთ მოყვანილი უგანზომილებო სიდიდეები, ასევე სიდიდეები $\bar{x} = x/h_0, \bar{z} = z/h_0$ (h_0 - დადულებული ფენის სიმაღლეა დეფორმაციამდე). დეფორმაციის სიჩქარეების კომპონენტებს, ექვივალენტურ დეფორმაციის სიჩქარეს, უდკვისტის პარამეტრს და მდგომარეობის განტოლებას უგანზომილებო სიდიდეებში აქვს სახე:

$$\bar{\xi}_x = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}, \bar{\xi}_z = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}}, \bar{\eta}_{xz} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right),$$

$$\bar{\xi}_e = 2/(\lambda\sqrt{3}) \sqrt{(\partial \bar{v}_x / \partial \bar{x})^2 + (\partial \bar{v}_x / \partial \bar{z} + \partial \bar{v}_z / \partial \bar{x})^2 / 4}, \bar{\kappa} = \lambda \int \bar{\xi}_e / \bar{v}_x d\bar{x}, \bar{\sigma}_e = \bar{\xi}_e^m \bar{\kappa}^n. \quad (19)$$

შემოღებულია აღნიშვნა $\psi = \bar{\sigma}_e / \bar{\xi}_e$. (19) თანაფარდობების გამოყენებისას, ψ ფუნქციისათვის გვაქვს:

$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \left\{ \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x} \right\}^n . \quad (20)$$

(20) განტოლების მარჯვენა ნაწილში ინტეგრალის გამოსათვლელად შემოღებულია აღნიშვნა:

$$\varphi(\bar{x}, \bar{z}) = \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x} . \quad (21)$$

$\varphi(\bar{x}, \bar{z})$ ფუნქციისათვის გვაქვს დიფერენციალური განტოლება:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} = \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x . \quad (22)$$

(21) გამოსახულების გათვალისწინებით, ψ ფუნქცია მიიღებს სახეს:

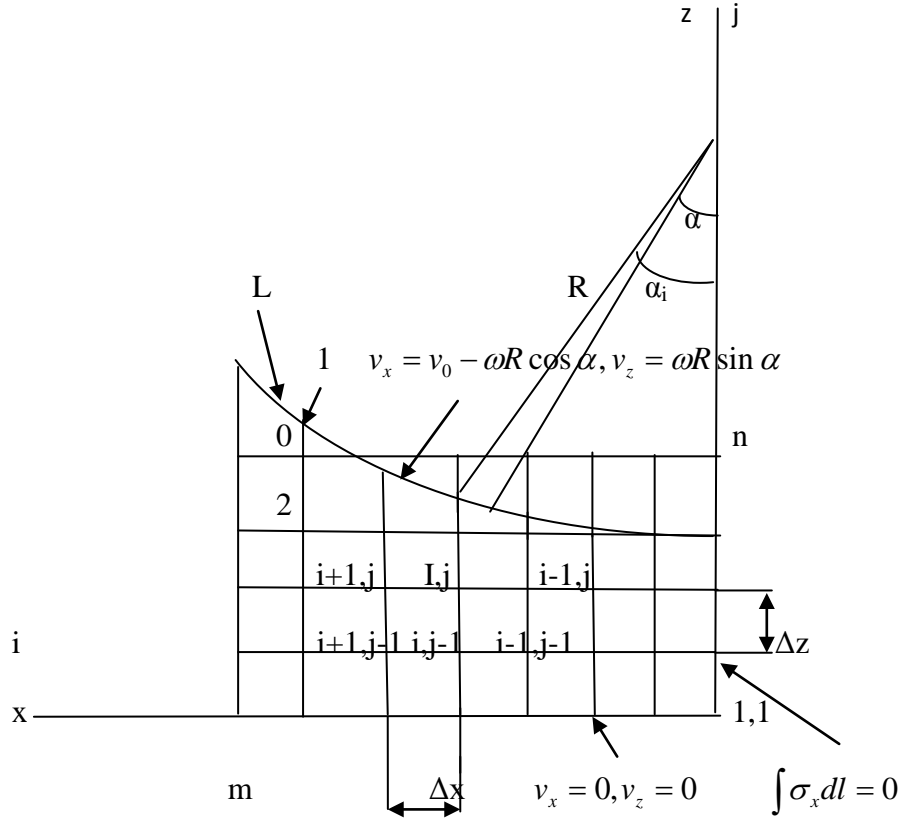
$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \varphi^n(\bar{x}, \bar{z}) . \quad (23)$$

ზემოთ მიღებული აღნიშვნების გამოყენებისას, (18) დიფერენციალური განტოლებები ჩაიწერება ფორმაში:

$$\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}}\right) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{x}^2}\right) + 4 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}} + \psi \left(\frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^3} + \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x}^3} + 3 \frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}^2}\right) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_0}{\partial \bar{x}} + \frac{2}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{x}} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{3\lambda} \psi \left(2 \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} \right) + \frac{1}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) = 0$$

კერძო წარმოებულებიანი დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის სხვაობითი სქემის აგება დაფუძნებულია ბადის შეყვანაზე განსახილველ სივრცეში (ნახ.7). ბადის კვანძები საანგარიშო წერტილებს წარმოადგენს.



ნახ.7 ინტეგრირების არის დაყოფის მართკუთხა ბადე

სასრულ სხვაობებში ძირითად განტოლებებს აქვთ სახე:

$$\varphi_{i,j} = \varphi_{i-1,j} + \Delta \bar{x} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right] \frac{1}{\bar{v}_{xi,j}},$$

$$\psi_{i,j} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \varphi_{i,j},$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{xi,j} = & \left\{ \frac{\bar{\sigma}_{0i+1,j} - \bar{\sigma}_{0i-1,j}}{2\Delta \bar{x}} + \frac{1}{6\lambda \Delta \bar{x}^2} (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j})(\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) + \frac{\psi_{i,j}}{3\lambda} \left[2 \frac{\bar{v}_{xi+1,j} + \bar{v}_{xi-1,j}}{\Delta \bar{x}^2} + \right. \right. \\ & \left. \frac{\bar{v}_{xi,j+1} + \bar{v}_{xi,j-1}}{\Delta \bar{z}^2} + \frac{1}{4\Delta \bar{x} \Delta \bar{z}} (\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - \bar{v}_{zi+1,j-1} + \bar{v}_{zi-1,j-1}) \right] + \\ & \left. \frac{1}{12\lambda} \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{\Delta \bar{z}} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{\Delta \bar{x}} \right) \right\} / \left[\frac{2}{3\lambda} \psi_{i,j} \left(\frac{2}{\Delta \bar{x}^2} + \frac{1}{\Delta \bar{z}^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta\bar{x}} \right) \left(\frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta\bar{z}^2} - \frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta\bar{x}^2} \right) + \\
& \frac{1}{2\Delta\bar{x}^2 \Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) (\psi_{i+1,j+1} - \psi_{i+1,j-1} - \psi_{i-1,j+1} + \psi_{i-1,j-1}) + \\
& \psi_{i,j} \left[\frac{\bar{v}_{xi,j+2} - 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} - \bar{v}_{xi,j-2}}{2\Delta\bar{z}^3} - \frac{\bar{v}_{zi+2,j} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} - \bar{v}_{zi-2,j}}{2\Delta\bar{x}^3} + \right. \\
& \left. \frac{\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} + \bar{v}_{zi+1,j-1} - \bar{v}_{zi-1,j-1}}{2\Delta\bar{x}\Delta\bar{z}^2} + \frac{3}{2\Delta\bar{x}^2 \Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j+1} - \bar{v}_{xi+1,j-1} - \right. \\
& \left. 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} + \bar{v}_{xi-1,j+1} - \bar{v}_{xi-1,j-1}) \right] = 0
\end{aligned}$$

სასაზღვრო პირობები: $\bar{v}_{xi,j} = 0; \bar{v}_{zi,j} = 0; (i = 1, 2, \dots, m; j = 1)$
 $\bar{v}_{xi,j} = \bar{v}_0 - \cos \alpha_i, \bar{v}_{zi,j} = \sin \alpha_i; (i, j \in L), \quad \int \sigma_x dl = 0; (i = 1, j \in [1, \dots, n])$

განხილულია სხვაობითი სქემის კრებადობის, აპროქსიმაციის და მდგრადობის საკითხები.

დისერტაციის მეოთხე ნაწილში განხილულია ბრტყელი ზედაპირების დადუღებით აღდგენის შესაძლებლობების ექსპერიმენტალური კვლევა. როგორც პირველ თავში იყო აღნიშნული, გაცვეთილი დეტალების დადუღებით აღდგენისას ცდილობენ მიიღონ ისეთი ზედაპირები, რომელთა ცვეთამედეგობა არანაკლები იქნება, ვიდრე ახალი დეტალებისა. მაგრამ ეს ყოველთვის შესაძლებელი არ არის, განსაკუთრებით მაღალნახშირბადიანი და მაღალი სიმტკიცის ფოლადების დადუღებით აღდგენისას. უდეფექტო ძირითადი ლითონის ტოლფასი შენადული შეერთების მიღება, მაღალცვეთამედეგობასთან ერთად, ზოგჯერ ვერ ხერხდება

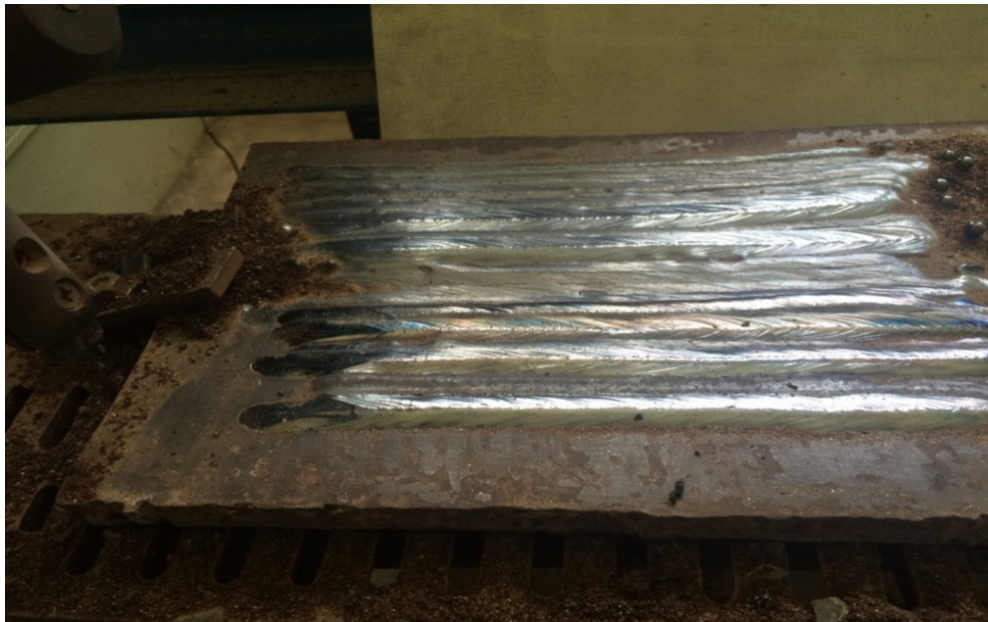
არსებობს შენადულ შეერთებაში ბზარის ტიპის დეფექტების თავიდან აცილების უამრავი გზა (წინასწარი შეთბობა, შედუღების შემდეგში თერმული დამუშავება და სხვა). მაგრამ, ხშირ შემთხვევაში, მრავალმხრივი მცდელობის მიუხედავად, შენადულ შეერთებაში მაინც რჩება დეფექტები ან მათი წარმოშობის კერები. დადუღება-შედუღების შემდეგ ხშირად მიმართავენ შედუღების ძაბვებისა და დეფორმაციების მოხსნის სხვადასხვა ხერხებს, რომლებიც ამავდროულად დადუღებული ლითონის ზედაპირს ამტკიცებენ.

დისერტაციის ამ თავში ასევე განხილულია ბრტყელი ზედაპირების დადუღებით აღდგენისას, შენადულ შეერთებაში ბზარის ტიპის დეფექტების ზომები, რაოდენობის მინიმუმამდე შემცირების გზები და ამ დეფექტების ან მათი წარმოშობის კერების პლასტიკური დეფორმაციის საშუალებით აღმოფხვრის გზები.

კვლევისათვის შერჩეული იქნა ფლ.45 და ფლ.60. დადუღებით აღდგენისას ექსპერიმენტული კვლევისათვის შერჩეული იქნა შედუღება ფლუსის საფარში, როგორც ხარისხიანი დადუღებული ლითონის მიღების საუკეთესო ხერხი. საშემდუღებლო მასალები - მავთული СВ-08ХТ2СМФ და ფლუსი АН-348А,

შერჩეული იქნა სათანადო ცვეთამდეგობისა და დეფექტების წარმოშობისადმი წინააღმდეგობის მიღების შესაძლებლობის გათვალისწინებით. კვლევის პროცესში დადგენილი იქნა შედუღების ოპტიმალური რეჟიმები და დადუღების ტექნოლოგია, რომელიც აუცილებლად ითვალისწინებს ყოველი მომდევნო დადუღებული ლილვაკით წინას გადაფარვას სანახევროდ მაინც, ძირითადი ლითონის წილის შესამცირებლად დადუღებულში და ამით ბზარებისადმი წინააღმდეგობის ამაღლებას.

ნიმუშები დადუღებული იქნა ერთ და ორ ფენად (ნახ.8,9). ორფენიანი დადუღებული ლითონის შემთხვევაში ბზარების რაოდენობა და ზომები გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ერთფენიანში (ნახ.10,11) და დადუღებული ლითონის ზედაპირი უფრო თანაბარია.



ნახ.8 ერთფენიანი დადუღებული ლითონი



ნახ.9 ორფენიანი დადუღებული ლითონი



ნახ.10 ზხარების რაოდენობა და მათი ზომები ერთფენიან დადუღებულ ფოლადში



ნახ.11. ბზარების რაოდენობა და მათი ზომები ორფენიან დადუღებულ ფოლადში

დადუღებულ ლითონში, სადაც ბზარები აღმოჩნდა, ამოჭრილი იქნა სხვადასხვა ზომის ნიმუშები შემდგომი პლასტიკური დეფორმაციისათვის. მეტალოგრაფიული კვლევისათვის ნიმუშები მოიწამლა 4%-იანი აზოტმჟავით.

გამზადებული ნიმუშები გახურებული იქნა ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურამდე 650-700°C-მდე ლუმელში და დადუღებული ზედაპირი პლასტიკურად იქნა დამუშავებული გრდემლზე უროთი. როგორც ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, ბზარები მთლიანად გაქრა ცალკეულ დადუღებულ ნიმუშებზე.

ერთ- და ორფენიან ნიმუშებზე, სადაც გავლების რაოდენობა რვას აღემატებოდა, ბზარები მთლიანად არ აღმოიფხვრა დიდი ზომის ნიმუშებზე ტემპერატურის შემცირების გამო 200°C. მაგრამ მათი რაოდენობა მნიშვნელოვნად შემცირდა. ამის შემდგომ ექსპერიმენტები გაგრძელდა ლაბორატორიულ საგლინავ დგანზე.

ექსპერიმენტების შედეგებმა გვიჩვენა, რომ ჩვენს მიერ დამზადებულ ყველა ნიმუშზე პლასტიკური დეფორმაციის შემდეგ ბზარები აღმოიფხვრა (ნახ.12).



ნახ.12 ნიმუში ბზარების გარეშე პლასტიკური დეფორმაციის შემდეგ

დადუღებული ლითონის მიკროსტრუქტურა პირველ ფენაში - ტროოსტიტია, ლეგირებული ფერიტით, მეორე ფენაში - სორბიტი კოაგულირებული ცემენტიტის შემადგენლობით, სისალით 285-330 HV, ნაკერმიმდებარე ზონის სტრუქტურა კი - ბეინიტია პლასტიკური სორბიტით, სისალით 290-340 HV. ზოგიერთ უბანზე შეიმჩნეოდა მარტენსიტული სტრუქტურა.

მიღებულმა შედეგებმა გვიჩვენა, რომ ნიმუშებში, რომლებიც გახურებული იქნა 650-700°C ტემპერატურულ ინტერვალში და დამუშავდა პლასტიკური დეფორმაციით საგლინავ დგანებზე, ბზარები სრულიად აღმოიფხვრა. ზედაპირული ფენის სტრუქტურა ხელსაყრელია. დადუღებული ლითონის სისაღემ გვაჩვენა, რომ მისი ცვეთამედეგობა გაცილებით მეტია, ვიდრე ფლ.60-ისა. რაც შეეხება უროთი დამუშავებულ ნიმუშებს, ბზარების აღმოფხვრა დამოკიდებულია დადუღებული ლითონის ფართზე (ნიმუშის ზომებზე).

ძირითადი შედეგები და დასკვნები

1. შესწავლილია ბრტყელ ზედაპირზე დადუღებული ფენის ცილინდრული გორგოლაჭით შემოგორვისას პლასტიკური დეფორმაციის ერთგანზომილებიანი ამოცანა, კონტაქტის ზედაპირზე კულონის ხახუნის კანონის გათვალისწინებით. მასალის მდგომარეობის განტოლება შერჩეულია ცოცვადობის თეორიის (განმტკიცების თეორიის) საფუძველზე.
2. არაწრფივი ერთგანზომილებიანი ამოცანის რიცხვითი ანალიზისათვის დამუშავებულია გამოყენებითი პროგრამა Mathcad-ის მათემატიკურ რედაქტორში.
3. გაანგარიშებით დადგენილი იქნა, რომ დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა დეფორმაციის კერაში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული λ სიდიდეზე ($\lambda = h_0 / R; h_0, R$ - შესაბამისად, ფენის სისქეა დეფორმაციამდე და გორგოლაჭის რადიუსი) და μ ხახუნის კოეფიციენტზე მასალის გორგოლაჭთან კონტაქტის ზედაპირზე.
4. დადგენილია, რომ λ -ს განსაზღვრული მნიშვნელობებისას ხახუნის ძალები იცვლიან მიმართულებას კონტაქტის ზედაპირის მცირე უბანზე. საკონტაქტო წნევა იღებს მაქსიმალურ მნიშვნელობას კონტაქტის ზედაპირის წერტილში, რომლის კუთხური კოორდინატა $\alpha = 0,05$, შემდეგ კი მცირდება. $\lambda = 0,5$ და $\mu = 0,3$ მნიშვნელობებისას ნორმალური ძაბვა მოგორვის მიმართულებით არსებითად მცირდება და ფაქტიურად ნულის ტოლია.
5. ჩამოყალიბებულია მოგორვისას დადუღებული ფენის არადრეკადი დეფორმირების ორგანზომილებიანი ამოცანა. განმტკიცების თეორიის საფუძველზე მიღებულია არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ჩაკეტილი სისტემა და ჩაიწერა სასაზღვრო პირობები.
6. კერძო წარმოებულებიანი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების რიცხვითი ამოხსნისათვის შემოთავაზებულია ბადეების მეთოდი. დიფერენციალური განტოლებების სისტემა და სასაზღვრო პირობები ჩაიწერა სასრულ სხვაობებში. სასაზღვრო პირობები კონტაქტის მრუდწირული ზედაპირის მახლობლად ჩაწერილი იქნა წრფივი ინტერპოლაციის გამოყენებით.
7. დადგენილია, რომ დადუღებულ ლითონში ბზარების რაოდენობა და მათი ზომები დამოკიდებულია დადუღებულ ლითონში ძირითადი ლითონის მონაწილეობის წილზე და ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე.

8. დადუღების შემდგომი პლასტიკური დეფორმაციისათვის გახურების ოპტიმალური ტემპერატურა იმყოფება 650-700⁰C ინტერვალში, რაც შენადული შეერთებისა და დადუღებული ლითონის დეფექტების აღმოფხვრის საშუალებას იძლევა. იზრდება დადუღებული ლითონის სიმტკიცე (ცვეთამედეგობა).
9. დადგენილია, რომ პლასტიკური დეფორმაციის პროცესში დადუღებულ ლითონში ბზარების აღმოფხვრის ალბათობა დამოკიდებულია დადუღებული ლითონის ფართზე, დამუშავების სახეზე და მცირდება ტემპერატურის შემცირებისას.
10. დადუღებული ფენის გაანგარიშების დამუშავებული მეთოდიკა შეიძლება გამოყენებული იქნას ტექნოლოგიური პროცესის პარამეტრების განსაზღვრისათვის ბრტყელი ზედაპირების აღდგენისას.

დისერტაციის ძირითადი დებულებები ასახულია შრომებში

1. Киквидзе О.Г., Тулеугалиева Г.Б., Булекбаева Г.Ж., Бекенова А., Билашова Г. Расчет граничного слоя при пластическом деформировании поверхностей// Georgian Engineering News №4 (Vol. 60).-2011.-pp.51-55
2. Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г., Кипиани П.Н., Миндадзе С.О. Пластическая деформация как средство для устранения дефектов типа трещин в сварных соединениях//Kutaisi. BULLETIN OF AKAKI TSERETELI STATE UNIVERSITY №1().- 2016.-pp.
3. Киквидзе О.Г., Булекбаева Г.Ж., Кипиани П.Н. Пластическое деформирование наплавленного слоя на плоской поверхности// Georgian Engineering News №1 (Vol.).-2016.-pp.(53)
4. Кипиани П.Н., Миндадзе С.О., Булекбаева Г.Ж. Разработка энергосберегающей технологии с применением послесварочной пластической деформации при сварке и наплавке высокопрочных сталей. // Междунар. науч. конф.: «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития», 24-25.10.2015. – Кутаиси, 2015, с.234-236.