

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„Київський політехнічний інститут“

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ
„Київський політехнічний інститут“



Серія
МАШИНОБУДУВАННЯ

Заснований в 1964 р.

№60

Розглянуто і рекомендовано до видання на засіданні Вченої ради Механіко – машинобудівного інституту НТУУ "КПІ" (протокол № 10 від "26" квітня 2010 р.)

КИЇВ 2010

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ
„Київський політехнічний інститут“

МАШИНОБУДУВАННЯ

Ознайомлення з новітніми досягненнями в галузі машинобудування, результатами наукових досягнень та вдосконаленими методами розрахунку і проектування елементів машинобудівних конструкцій.

Для вчених та науково-технічних фахівців у галузі машинобудування.

Редакційна колегія:

М. І. Бобир, д-р техн. наук, проф. (відповідальний редактор), (НТУУ “КПІ», Україна)

О. Ф. Луговський, д-р техн. наук, проф. (заст. відповід. редактора), (НТУУ “КПІ», Україна)

В. М. Гуць, (відповідальний секретар), (НТУУ “КПІ», Україна)

О. М. Яхно, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

Ю. М. Данильченко, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

Н. С. Равська, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

В. Б. Струтинський, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

Ю. М. Кузнєцов, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

Ю. В. Петраков, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

О. П. Гавриш, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

В. С. Коваленко, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

В. А. Тітов, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

В. І. Стеблюк, д-р техн. наук, проф., (НТУУ “КПІ», Україна)

В. С. Майборода, д-р техн. наук, проф. (НТУУ “КПІ», Україна)

Ljubodrag Tanovic, prof. Doc. hab., (University of Belgrad, Сербія)

Eugeniusz Rusinski, prof. Doc. hab., (Wroclaw University of Technology, Польща)

Jaroslav Strycek, prof. Doc. hab., (Wroclaw University of Technology, Польща)

Holm Altenbach, prof. Doc. hab., (Martin-Luther-University Halle Witter-berg, Німеччина)

Vadim Silberschmidt, prof. Doc. hab., (Loughborough University, Великобританія)

**Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
серія КВ №15139-3711Р від 06.05.09р**

УДК 612.7

Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування. - К.: НТУУ "КПІ". - 2010. - 59.

Матеріали статей представлені в редакції авторів. Статті прорецензовані.

Технічний редактор, комп'ютерна верстка: І. І. Бабієнко, Р.С. Борис, А.Д. Лаврінєнков

Адреса редакційної колегії:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Механіко - машинобудівний інститут.
тел. 236-10-43.

Видано за замовленням НТУ України "Київський політехнічний інститут"

**Поширення і тиражування без офіційного
дозволу видавництва заборонені**

© ММІ НТУУ "КПІ", 2010

В.В. Чигиринский, А.Ф. Бичевой, В.И. Дубина, М.В. Чигиринский Аналитическое определение модели реальной пластической среды.....	124
Р.И. Сивак, И.О. Сивак Пластичность металлов при сложном нагружении.....	129
В.А. Огородніков, В.С. Перлов, С.В. Войтків Керування технологічною спадковістю при листовому штампуванні з метою підвищення безпеки конструкції.....	133
Е.Н. Смирнов Напряженное состояние непрерывнолитых блюмов при их деформировании в процессе непрерывнолитого литья.....	138
В.М. Михалевич, В.А. Краевский Постановка и решение оптимизационных задач в теории деформируемости.....	142
А.В. Данько, В.М. Данько Застосування методу ліній ковзання при нерівномірному розподілі опору деформації по довжині зони деформації.....	146
Б.П. Серета, Т.В. Критська, А.К. Коваленко Закономерности изменения степени использования запаса пластичности осевой зоны прокатываемых высоких полос при варьировании геометрических факторов очага деформации.....	151
В.І. Носуленко, В.М. Шмельов Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штампів суміщеної дії.....	154
О.П. Максименко, Р.Я. Романюк Теоретическое исследование процесса прокатки с отставанием металла в очаге деформации.....	159
Н.Н. Мороз, Д.В. Мосьпан, В.В. Драгобецкий Разработка стратегии поиска технических решений в производстве ободьев колес.....	163
С.Б. Каргин Инновационные технологииковки крупных поковок.....	165
В.В. Кухарь Формоизменение при профилировании продольным изгибом заготовок с различной формой поперечного сечения.....	169
И.П. Мазур Контроль качества поверхности горячекатаных полос.....	174
Н.Е. Нехаев, М.К. Измайлова, Е.В. Галицкий Определение кинематически возможного поля скоростей при прокатке п-образных профилей в четырёхвалковых калибрах.....	179
И.В. Добров, А.В. Семичев, В.А. Грядунов, И.И. Гетьман Новое поколение роликовых волок с опорными роликами и рабочими роликами малого диаметра.....	183
Н.В. Нижник Повышение надежности оборудования главной линии прокатных станов на основе моделирования нестационарных режимов нагрузок.....	188
М.В. Краев, В.А. Гринкевич, В.С. Краева Перспективы совершенствования технологических процессов листовой штамповки многофазных сталей.....	191
Л.Л. Роганов, М.Л. Роганов, А.С. Рудченко Совершенствование приводных цилиндров и системы управления паровоздушных молотов.....	194
Л.Л. Роганов, Л.В. Попивненко Способы уменьшения внутренних напряжений в прессовках внутри матриц закрытых пресс-форм.....	197
А.В. Явтушенко, Б.П. Серета, Т.А. Васильченко, А.В. Глебенко Математическая модель планетарного привода кривошипных прессов.....	200
В.А. Луценко, П.В. Боровик Исследование влияния технологических параметров на асимметрию загрузки прокатных валков.....	204
С.А. Снитко Экспериментально-теоретический метод расчета условий контактного трения при прокатке заготовок железнодорожных колес.....	208
О.И. Тришевский, С.Ю. Плещенцов Разработка методики исследований специальных гнутых профилей с элементами изгиба на 180° и технологии их производства.....	212
Б.С. Каргин, С.Б. Каргин, Р.О. Ткачѐв Инновационные технологии изготовления и подачи смазок при горячей объемной штамповке сталей.....	216

УДК 621.77

В.М. Михалевич, д.т.н., В.А. Краевский, к.т.н.
Винницький національний технічний університетПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ В ТЕОРИИ
ДЕФОРМИРУЕМОСТИ

У роботі зроблений аналіз розв'язків варіаційної задачі для гарячого деформування для випадків двохступеневої та трьохступеневої зміни швидкості деформування й сформульовані варіаційні задачі для холодного деформування та тривалості міцності.

In work the analysis of the variation problem decisions for hot deformation for cases of two-stage and three-stage strain rate change is made and variation problems for cold deformation and durability are formulated

В отличие от холодного деформирования при горячем на интенсивность накопления повреждений, а соответственно, и на предельную деформацию, существенное влияние оказывает скорость деформирования. Это параметр, который во многих процессах обработки металлов давлением можно варьировать в широких пределах. Поэтому очень важно научиться управлять скоростью деформирования так, чтобы обеспечить максимальное использование пластических свойств материала. Для этой цели в работе [1] были сформулированы две вариационные задачи для процесса горячего деформирования. Первая задача формулируется так: определить закон изменения скорости деформации $\dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon}_u(t)$, при котором заданная накопленная деформация ε_* достигается за кратчайшее время t_*

$$\begin{aligned} t_* = t_*(\dot{\varepsilon}_u(t)) &\rightarrow \min, \\ \varepsilon_* &= \int_0^{t_*} \dot{\varepsilon}_u(\tau) \cdot d\tau, \\ \int_0^{t_*} \varphi(t_* - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau &= 1, \\ \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau &\leq 1, \forall t \in (0, t_*). \end{aligned} \quad (1)$$

где t, τ – время; $\varphi(t - \tau, I(\tau))$ – ядро наследственности; f – некоторая функция.

Формулирование второй задачи: определить закон изменения скорости деформации $\dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon}_u(t)$, при котором за заданное время t_* материал приобретает наибольшую деформацию ε_*

$$\begin{aligned} \varepsilon_* &= \int_0^{t_*} \dot{\varepsilon}_u(\tau) \cdot d\tau \rightarrow \max, \\ \int_0^{t_*} \varphi(t_* - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau &= 1, \\ \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau &\leq 1, \forall t \in (0, t_*). \end{aligned} \quad (2)$$

Предпоследнее условие в задачах (1) и (2) показывает очевидный факт, что для обеспечения оптимального режима необходимо использовать весь ресурс пластичности материала, то есть в момент времени t_* состояние материала должно быть близким к разрушению. В то же время последнее условие исключает возможность преждевременного разрушения материала.

Задачу (2) удалось решить для класса кусочно-постоянных функций: для случаев двухступенчатой [2] и трехступенчатой схемы изменения скорости деформаций. Так для двухступенчатого случая изменения скорости деформаций

$$\dot{\varepsilon}_u(t) = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_{u1}, & 0 \leq t \leq t_1; \\ \dot{\varepsilon}_{u2}, & t_1 < t \leq t_*, \end{cases} \quad (3)$$

задача (2) сведена к задаче нелинейного программирования

$$\begin{aligned} \varepsilon_* &= \dot{\varepsilon}_{u1} \cdot t_1 + \dot{\varepsilon}_{u2} \cdot (t_* - t_1) \rightarrow \max, \\ \left(\frac{t_*}{t_{*1}}\right)^n + \left(\frac{t_* - t_1}{t_{*2}}\right)^n - \left(\frac{t_* - t_1}{t_{*1}}\right)^n &= 1, \\ t_1 &\leq t_{*1}, \end{aligned} \quad (4)$$

в которой целевая функция зависит от трех неизвестных $\dot{\varepsilon}_{u1}, \dot{\varepsilon}_{u2}, t_1$. Здесь

$$t_{*i} = t_{*c} \left(\dot{\varepsilon}_{ui} \right), \quad (5)$$

где t_{*c} – известная функция, которая характеризует свойства материала.

Задачу (4) решили с помощью метода множителей Лагранжа. В результате получили оптимальную схему, которая определяется системой

$$\begin{cases} \frac{d}{d\dot{\varepsilon}_{u1}} \left\{ \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{1-\frac{1}{n}} + \left[\gamma^n - \dot{\varepsilon}_{u1} \left(t_*^n - \left(t_* - \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n \right) \right] \cdot \left(t_* - \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^{1-n} \right\} = 0; \\ \dot{\varepsilon}_{u2} = \frac{\gamma^n - \dot{\varepsilon}_{u1} \left[t_*^n - \left(t_* - \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n \right]}{\left(t_* - \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}} \right)^n}; \\ t_1 = \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}}. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогичный подход использовали и для трехступенчатой схемы

$$\dot{\varepsilon}_u = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_{u1}, & 0 \leq t \leq t_1; \\ \dot{\varepsilon}_{u2}, & t_1 \leq t \leq t_2; \\ \dot{\varepsilon}_{u3}, & t_2 \leq t \leq t_*. \end{cases} \quad (7)$$

для которой также удалось найти оптимальное решение в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \dot{\varepsilon}_{u1}} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial t_2} = 0; \quad t_1 = \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{\frac{1}{n}}; \\ \dot{\varepsilon}_{u2} = \frac{\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n}; \\ \dot{\varepsilon}_{u3} = \frac{\dot{\varepsilon}_{u1}(t_* - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^n} + \frac{\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n}{(t_2 - t_1)^n} - \\ - \frac{(\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1}(t_2 - t_1)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n)(t_* - t_1)^n}{(t_2 - t_1)^n(t_* - t_2)^n}, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F(\dot{\varepsilon}_{u1}, t_2) &= \gamma \dot{\varepsilon}_{u1}^{1-\frac{1}{n}} + \left(\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n \right) \cdot \rho(t_2)^{1-n} + \\ &+ \frac{\dot{\varepsilon}_{u1} \cdot \rho(t_*)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_*^n + \gamma^n}{(t_* - t_2)^{n-1}} + \frac{(\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n)(t_* - t_2)}{\rho(t_2)^n} - \\ &- \frac{(\gamma^n + \dot{\varepsilon}_{u1} \cdot \rho(t_2)^n - \dot{\varepsilon}_{u1}t_2^n) \cdot \rho(t_*)^n}{(t_* - t_2)^{n-1} \cdot \rho(t_2)^n}. \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношения (6) и (8) использовали для моделирования непрерывного кручения образцов из стали 14X17H2 при температуре 1150°C [3]. При кручении с постоянной скоростью максимальная деформация, которую может выдержать материал до разрушения $\varepsilon_* = 1.8$. При использовании двухступенчатой схемы деформирования, параметры которой определяются решением системы (6).

$$\dot{\varepsilon}_u(t) = \begin{cases} 0.4329 \text{ c}^{-1}, & 0 \leq t \leq 3.4268; \\ 0.0164 \text{ c}^{-1}, & 3.4268 < t \leq 30, \end{cases} \quad (10)$$

получим деформацию $\varepsilon^* = 1.914$. Как показывает анализ, проведенный в работе [2], использование других схем двухступенчатого деформирования приводит к уменьшению граничной деформации. Согласно расчетам оптимальная трехступенчатая схема имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_u = \begin{cases} 1.59 \text{ c}^{-1}, 0 \leq t \leq 0.821; \\ 0.048 \text{ c}^{-1}, 0.821 < t \leq 9.713; \\ 0.01 \text{ c}^{-1}, 9.713 < t \leq 30. \end{cases} \quad (11)$$

Накопленная деформация при использовании схемы (11) $\varepsilon^* = 1.939$. Динамика изменения накопленной деформации в процессе деформирования при использовании разных режимов показана на рис. 1. Следует отметить, что эффект от оптимизации будет больше для материалов с ярко выраженной зависимостью граничных деформаций от скорости деформаций.

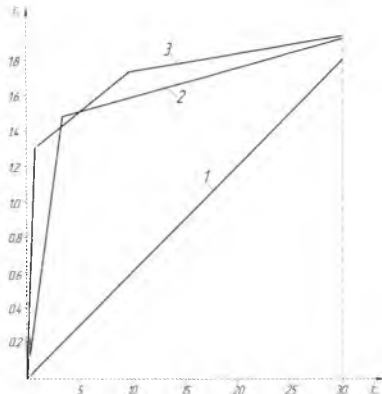


Рис. 1. Динамика изменения накопленной деформации: 1 – при деформировании с постоянной скоростью; 2 – при деформировании по схеме (10); 3 – при деформировании по схеме (11)

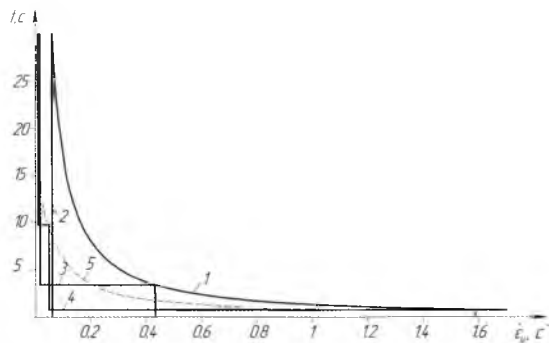


Рис. 2. Зависимость времени до разрушения от схемы изменения скорости деформирования: 1 – кривая пластичности $t_{*c} = t_{*c}(\dot{\varepsilon}_u)$; 2 – деформирование с постоянной скоростью; 3 – деформирование по схеме (10); 4 – деформирование по схеме (11); 5 – деформирование по непрерывному закону изменения скорости

Полученные результаты показывают, что для двух- и трехступенчатого деформирования оптимальными являются схемы с понижением скорости деформирования. При этом с увеличением количества ступеней ε^* также увеличивается (рис. 2). Тогда, возможно, оптимальную схему мы получим при неограниченном возрастании количества ступеней, следовательно, существует закон изменения скорости деформации, который является решением задачи (2) и описывается непрерывной функцией (кривая 5 на рис. 2).

По аналогии с горячим деформированием соответственные вариационные задачи можно сформулировать как для холодного деформирования

$$A^* = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma_u d\varepsilon_u, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \int_0^{\varepsilon^*} \varphi(\varepsilon_u, I(\varepsilon_u)) d\varepsilon_u = 1; \\ 0 \\ \int_0^{\varepsilon_u} \varphi(\varepsilon_u, I(\varepsilon_u)) d\varepsilon_u \leq 1, \forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*), \\ 0 \end{cases}$$

так и для процесса длительной прочности

$$A^* = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma_u d\varepsilon_u,$$

$$\begin{cases} \int_0^{t^*} \varphi(t^* - \tau; I(\tau)) \sigma_u(\tau) d\tau = 1; \\ \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \sigma_u(\tau) d\tau \leq 1, \forall t \in (0, t^*), \end{cases} \quad (13)$$

где A^* – работа пластического деформирования на единицу объема, σ_u – интенсивность напряжений;

I – безразмерные инварианты напряженного состояния.

Анализ вариационных задач (12) и (13), а также поиск оптимального решения в классе непрерывных функций задач (1) и (2) являются предметом последующих исследований.

Выводы

В работе сделан анализ решений вариационной задачи для горячего деформирования для случаев двухступенчатого и трехступенчатого изменения скорости деформирования и сформулированы вариационные задачи для холодного деформирования и длительной прочности.

Список литературы

1. Михалевич В. М. Формулювання варіаційної задачі для моделі накопичення пошкоджень при гарячому деформуванні / Михалевич В. М., Краєвський В. О. // В зб.: «Обработка материалов тиском». Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2009. – №2(21). – С. 12-16. – ISBN 978-966-379-339-9.
2. Михалевич В. М. Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок / Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добрянюк Ю. В. // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк: – 2009 – Випуск 25, ч. 1 – С. 241-249. – ISBN 5-7763-8653-5.
3. Богатов А. А. Влияние горячей прерывистой деформации на пластичность металла / Богатов А. А., Смирнов М. В., Криницын В. А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – №12. – С. 37-40.