

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

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

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

где  $t, \tau$  – время;  $\phi(t - \tau, I(\tau))$  – 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  $\varepsilon_*$

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

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.

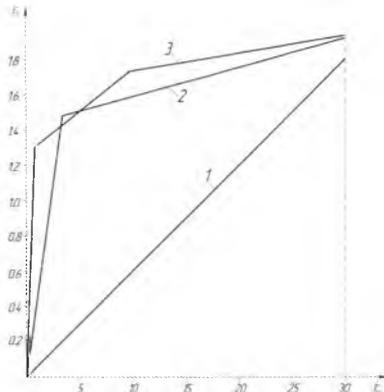


Рис. 1. Динамика изменения накопленной деформации: 1 – при деформировании с постоянной скоростью; 2 – при деформировании по схеме (10); 3 – при деформировании по схеме (11)

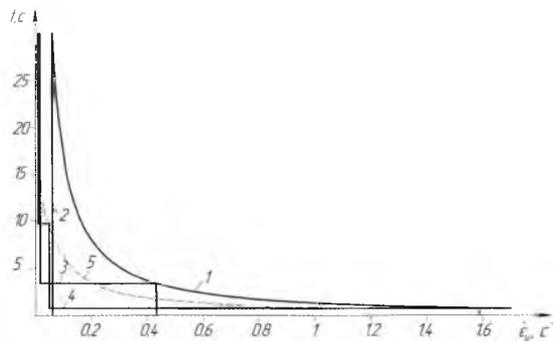


Рис. 2. Зависимость времени до разрушения от схемы изменения скорости деформирования: 1 – кривая пластичности  $t_{*c} = t_{*c}(\dot{\varepsilon}_u)$ ; 2 – деформирование с постоянной скоростью; 3 – деформирование по схеме (10); 4 – деформирование по схеме (11); 5 – деформирование по непрерывному закону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

Полученные результаты показывают, что для двух- и трехступенчатого деформирования оптимальными являются схемы с понижением скорости деформирования. При этом с увеличением количества ступеней  $\varepsilon_*$  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,  $\sigma_u$  – 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.