

Таким образом, полученные зависимости позволяют выполнить расчет режимов подачи воздуха вентиляторами по всей дистанции рольганга в зависимости от требуемой скорости охлаждения катанки или прогнозировать динамику изменения температуры.

*Результаты исследования:* 1) изучен и выполнен анализ особенностей технологического процесса двухстадийного охлаждения катанки в условиях СПЦ-2; 2) изучен и проанализирован процесс воздушного охлаждения второй стадии на рольганге Стельмора; 3) выполнены измерения температур на первом вентиляторе при разных режимах его работы; 4) определена математическая зависимость изменения температуры катанки на вентиляторе № 1 в зависимости от его подачи.

#### Литература

1. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 100–102.
2. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)», направления 1-42 01 01-01 «Металлургическое производство и материалобработка (металлургия)», специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2021. – 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Савченко, С. А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» УКХ «БМК» / С. А. Савченко, И. В. Астапенко // Беларусь в современном мире : материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 282–285.

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ**

**А. А. Болигатов, Д. А. Лысенко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научные руководители: Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов

*Выполнен анализ математических зависимостей, предназначенных для использования в расчетной оценке напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении.*

**Ключевые слова:** мегапрочный металлокорд, оптимизация волочения, моделирование процесса волочения.

В основе современной теории обработки материалов давлением лежат методы механики деформируемого твердого тела и теории пластичности. Используя математические закономерности данных теорий, рассмотрим задачу волочения проволоки через волоку (рис. 1). Решение задачи осуществим в цилиндрической системе координат при следующих основных упрощениях:

1) напряженно-деформированное и температурное состояние материала проволоки считаем осесимметричным, для чего будем пренебрегать внешними массовыми силами;

2) материал волоки считаем абсолютно жестким, а материал проволоки – сплошным, несжимаемым и пластичным;

3) считаем, что в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90 % работы пластического деформирования.

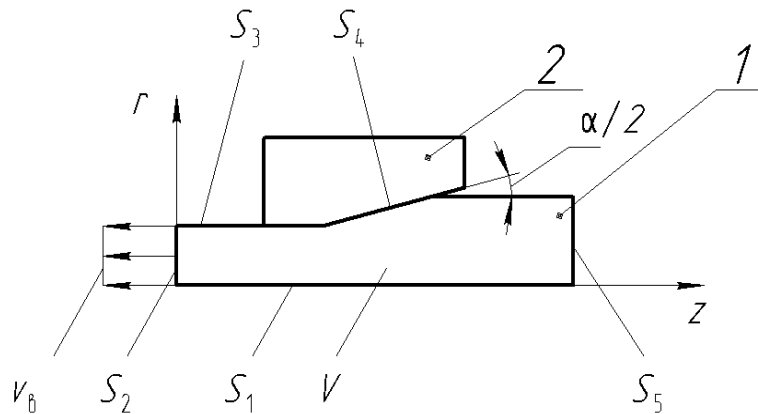


Рис. 1. Схема симметричной части деформации проволоки в волоке:  
1 – проволока; 2 – волока

С учетом принятых допущений установившееся напряженно-деформированное и температурное состояние всех точек сплошной среды, принадлежащих области  $V$  (рис. 1), ограниченной поверхностью  $S$ , будет описываться следующей системой уравнений [1–4]:

– уравнения движения:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = \rho a_r, \quad \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} = \rho a_z;$$

– уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0;$$

– уравнения связи деформаций и перемещений:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right);$$

– уравнения связи скоростей деформаций и скоростей перемещений:

$$\xi_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \xi_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}, \quad \xi_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \xi_{zr} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right);$$

– уравнения связи ускорений и скоростей:

$$a_r = v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}, \quad a_z = v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z};$$

– уравнение теории пластичности Мизеса:

$$(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + 6\sigma_{zr}^2 = 2\sigma_s^2,$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_s$  – сопротивление пластическому деформированию;  $a_i$  – компоненты вектора ускорения;  $\rho$  – плотность;  $v_i$  – компоненты вектора скорости;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $t$  – температура;  $c$  – теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Данная система уравнений решается при следующих граничных условиях:

– на поверхности  $S_1$ , совпадающей с осью  $z$ , выполняется условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \right|_{S_1} = 0, \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_1} = 0;$$

– на поверхности  $S_2$  задана скорость волочения проволоки:

$$v\vec{n}|_{S_2} = v_B;$$

– на свободной поверхности проволоки  $S_3$  отсутствуют внешнее давление и теплообмен с окружающей средой:

$$\sigma\vec{n}|_{S_3} = 0, \quad \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_3} = 0;$$

– на поверхности контакта проволоки и волокна  $S_4$  выполняется условие обтекания волокна материалом проволоки, действуют силы трения Амонтона–Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50 % работы сил трения:

$$v\vec{n}|_{S_4} = 0, \quad \vec{\tau}|_{S_4} = f \left| \sigma\vec{n}|_{S_4} \right| \frac{\vec{v}|_{S_4}}{|\vec{v}|_{S_4}}, \quad -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{S_4} = 0,5 \left| \vec{\tau}|_{S_4} \right| |\vec{v}|_{S_4};$$

– на поверхности  $S_5$  задано распределение температуры:

$$t|_{S_5} = t_0,$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $\vec{n}$  – направление нормали;  $f$  – коэффициент трения;  $\vec{\tau}$  – касательное напряжение;  $t_0$  – температура окружающей проволоку среды;  $v$  – скорость волочения проволоки.

Выполнен анализ математических зависимостей, предназначенных для использования в расчетной оценке напряженно-деформированного состояния и температурного поля очага деформации при волочении.

Литература

1. Аркулис, Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. – М. : Metallurgy, 1987. – 352 с.
2. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1987. – 688 с.
3. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов [и др.] ; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
4. Иванов, К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : ПИМаш, 2000. – 224 с.

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РОСТА АНОМАЛЬНО КРУПНЫХ ЗЕРЕН КАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

**Ю. Д. Черняков, А. Н. Жариков**

*Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев*

Научный руководитель А. Н. Жигалов

*Аномально крупные зерна могут быть причиной быстрого выхода из строя твердосплавного инструмента. Предотвращение роста таких зерен является многофакторной задачей, которую можно решить на этапе спекания.*

**Ключевые слова:** ингибиторы роста зерна, твердый сплав.

Известно, что размер карбидного зерна (WC) существенно влияет на физико-механические характеристики твердосплавных металлорежущих инструментов [1]. С уменьшением размера зерна увеличивается твердость (рис. 1).

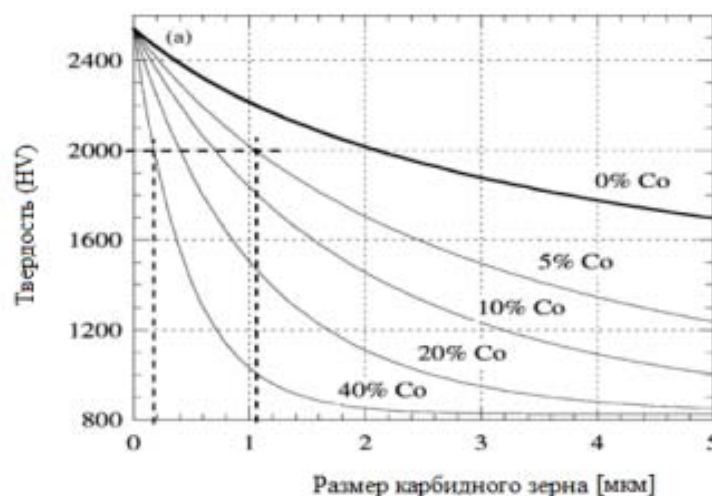


Рис. 1. Зависимость твердости от размера карбидного зерна