

Л.В. Морозов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1966. – № 6. – С. 105 – 111.

5. Данилов, В. Д. Опережение при прокатке профилей переменного сечения // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1974. – № 1. – С. 82 – 86.

6. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 319с.

7. Tsukamoto, H. Simulation of hot steel in plastic working with plasticine and lead / H. Tsukamoto, Y. Taura, J. Ibushi // Advanced technology of plasticity. – 1984, – Vol:II, – P. 53–59.

8. Грудев, А. П. Внешнее трение при прокатке. / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 287с.

9. Данилов, В. Д. Критический угол при продольной прокатке профилей переменного сечения в приводных валках равного диаметра / В.Д. Данилов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1974. – № 8. – С. 43–46.

УДК 631.7/9.016

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
В.А. КОРОЛЬ, д-р техн. наук,
Д.М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
Г.В. КОСТЕНКО (БНТУ)

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР

Согласно способу получения заготовок переменного профиля для малолистовых рессор, разработанному в научно-исследовательской лаборатории обработки материалов давлением БНТУ [1, 2], полосу, нагретую до 1000°С, прокатывают в валковой клети на специальном инструменте (деформирующей оправке), имеющем профиль, соответствующий профилю готового изделия. Начиная с момента поступления заготовки на вход в рабочую клеть и до полного окончания прокатки имеет место сначала частичный, а затем полный контакт горячей полосы с оправкой. В результате этого при прямом ходе оправки

(в процессе прокатки) происходит ее нагрев, который уже через несколько часов (2-2,5 ч) непрерывной работы стана вызывает повышение температуры оправки до 500-600⁰С. В процессе прокатки происходит также нагрев валков стана, однако вследствие того, что контакт заготовки с валками происходит не по всей их поверхности, а только на определенном участке и не на протяжении всего времени прокатки, температура валков оказывается значительно ниже (100-150⁰С) температуры оправки за одинаковое время работы стана. При холостом режиме работы стана, когда оправка без заготовки выходит из клетки, происходит ее частичное остывание, а также остывание валков вследствие конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой. Однако интенсивность такого теплообмена весьма незначительна по сравнению с интенсивностью нагрева оправки и валков при прокатке заготовки. В результате этого происходит быстрое повышение температуры оправки и валков, которая при дальнейшей работе стана, вследствие установившегося теплового баланса с окружающей средой, остается неизменной в течение всего времени работы стана.

Оправка и валки прокатного стана изготавливаются из инструментальной стали 5ХНМ, которая относится к полутеплостойким сталям повышенной вязкости, сохраняющей высокую прочность до 350-375⁰С. Таким образом, анализ теплового режима работы стана и механических характеристик инструментальной стали 5ХНМ показывает необходимость интенсивного охлаждения оправки при холостом ее ходе, которое обеспечило бы поддержание температуры оправки на уровне 200-250⁰С (max 300⁰С) для полного сохранения ее механических свойств. Что касается валков, то установившаяся температура на уровне 100-150⁰С не вызывает изменения механических свойств стали, и не ухудшает работоспособность валков, поэтому не возникает необходимость в использовании дополнительных средств охлаждения.

Для получения достаточно полной информации о тепловом состоянии оправки за один цикл прокатки и до стабилизации ее температуры была сформулирована и решена с помощью ЭВМ соответствующая задача с использованием программного обеспечения. Исходным уравнением при ее решении явилось уравнение теплового баланса [3]

$$Q_1 = Q_2, \quad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты, которое отдает нагретая заготовка оправке (и валкам); Q_2 – количество теплоты, которое принимает оправка (и валки) от заготовки.

Учитывая тот факт, что горячая заготовка отдает теплоту не только контактирующим с ней оправке и валкам, но и вследствие конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой, полное количество теплоты, теряемого заготовкой, равно

$$Q_1 = Q_{\text{опр}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{ср}} \quad (2)$$

$$\text{Здесь} \quad \left. \begin{aligned} Q_{\text{опр}} &= \alpha (T_i^{\text{заг}} - T_i^{\text{опр}}) S_i^{\text{опр}}; \\ Q_{\text{в}} &= \alpha (T_i^{\text{заг}} - T_i^{\text{вал}}) S_i^{\text{вал}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$Q_{\text{ср}} = \alpha_{\text{к+л}} (T_i^{\text{заг}} - T^{\text{возд}}) S^{\text{заг}}, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплопередачи с металла на металл, принятый в соответствии с [3] равным $920 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; $T_i^{\text{заг}}, T_i^{\text{опр}}, T_i^{\text{вал}}$ – соответственно температура заготовки, оправки, валков в каждый i -й момент времени, $^{\circ}\text{C}$; $S_i^{\text{опр}}, S_i^{\text{вал}}$ – соответственно площадь контакта заготовки с оправкой и валками в каждый i -й момент времени, м^2 ; $S^{\text{заг}}$ – площадь поверхности заготовки, м^2 ; $\alpha_{\text{к+л}}$ – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции и лучеиспускании:

$$\alpha_{\text{к+л}} = C_0 \varepsilon \frac{\left(\frac{T_i^{\text{заг}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_i^{\text{возд}} + 273}{100} \right)^4}{T_i^{\text{заг}} - T_i^{\text{возд}}} + \alpha_{\text{к}},$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$; ε – степень черноты тела; $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, принятый $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Количество теплоты, которое принимает оправка (или валки) в каждый i -й момент времени, определяется по теплосодержанию стали:

$$Q_2 = \frac{mc\Delta T}{\Delta\tau_i}, \quad (5)$$

где m – масса оправки (или валков), кг; c – теплоемкость металла, Дж/(кг · град);

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_i^{\text{опр}} &= (T_i^{\text{заг}} - \Delta T_{\text{к+л}}) - T_i^{\text{опр}}; \\ \Delta T_i^{\text{вал}} &= (T_i^{\text{заг}} - \Delta T_{\text{к+л}} - \Delta T_i^{\text{опр}}) - T_i^{\text{вал}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ΔT – изменение температуры оправки (ее нагрев) или валков, °С; $\Delta\tau_i$ – i -й момент времени.

При постановке задачи было учтено, что на протяжении всего процесса прокатки, начиная от момента поступления заготовки на вход рабочей клетки и заканчивая съемом заготовки на выходе, имеет место сначала неполный ее контакт с оправкой, а также неодновременный ее контакт со всеми тремя парами валков. В связи с этим весь процесс прокатки был разбит относительно времени и площади контакта на следующие этапы:

$\tau_{\text{общ}} = 10$ с – общее время прокатки;

$\tau_1 = 0,5$ с – заготовка поступает на вход клетки, контакт происходит только с оправкой, $S_1^{\text{опр}} = 0,037\text{м}^2$;

$\tau_2 = 1,7$ с – заготовка проходит через 1 пару валков, площадь контакта с оправкой $S_2^{\text{опр}} = 0,1\text{м}^2$;

$\tau_3 = 3$ с – заготовка проходит через 1 и 2 пары валков, площадь контакта с оправкой $S_3^{\text{опр}} = 0,2\text{м}^2$ (полное облегание) и с валком $S_i^{\text{вал}} = 0,006\text{м}^2$;

$\tau_4 = 1$ с – заготовка проходит в клетки и контактирует с тремя парами валков (полное облегание по оправке);

$\tau_5 = 1,8$ с – заготовка контактирует со средней и выходной парами валков (полное облегание по оправке);

$\tau_6 = 1$ с – заготовка контактирует только с последней парой валков и оправкой;

$\tau_7 = 1$ с – заготовка выходит из клетки и до момента съема контактирует только с оправкой ($S_7^{\text{опр}} = 0,2 \text{ м}^2$).

Исходные данные для расчета: $T_{\text{исч}}^{\text{заг}} = 1000^0 \text{ C}$; $T_{\text{исч}}^{\text{опр}} = 20^0 \text{ C}$;
 $T_{\text{исч}}^{\text{вал}} = 20^0 \text{ C}$; $T^{\text{возд}} = 20^0 \text{ C}$; $S_1^{\text{опр}} = 0,037 \text{ м}^2$; $S_2^{\text{опр}} = 0,11 \text{ м}^2$;
 $S_3^{\text{опр}} = 0,2 \text{ м}^2$; $S^{\text{вал}} = 0,006 \text{ м}^2$; $S^{\text{заг}} = 0,51 \text{ м}^2$; $m^{\text{опр}} = 300 \text{ кг}$;
 $m^{\text{заг}} = 22 \text{ кг}$; $m^{\text{вал}} = 105 \text{ кг}$; $c = 460 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; $\alpha_{\text{Ме-Ме}} = 920 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; $\alpha_{\text{ж}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$; $\epsilon = 0,8$.

Расчет производили через каждые 0,1 с ($\Delta t_i = 0,1$ с) при прямом и обратном ходе оправки (с учетом ее некоторого остывания) с использованием зависимостей (3) – (5), в результате чего на каждом i -м шаге расчета определяли следующие параметры:

$$\Delta T_i^{\text{заг}} = \Delta T_i^{\text{опр}} + \Delta T_i^{\text{вал}} + \Delta T_i^{\text{возд}},$$

где $\Delta T_i^{\text{заг}}$ – изменение температуры заготовки при теплообмене; $\Delta T_i^{\text{опр}}$, $\Delta T_i^{\text{вал}}$ – соответственно изменение температуры оправки и валков при нагревании; $\Delta T_i^{\text{возд}}$ – изменение температуры оправки за счет конвективного и лучевого теплообмена с окружающей средой.

При последующих расчетах на каждом $(i+1)$ -м шаге учитывали изменение температуры заготовки, оправки и валков, т.е.

$$T_{i+1}^{\text{заг}} = T_i^{\text{заг}} - \Delta T_i^{\text{заг}};$$

$$T_{i+1}^{\text{опр}} = T_i^{\text{опр}} + \Delta T_i^{\text{опр}};$$

$$T_{i+1}^{\text{вал}} = T_i^{\text{вал}} + \Delta T_i^{\text{вал}},$$

и тогда температуры $T_{i+1}^{\text{заг}}$, $T_{i+1}^{\text{опр}}$, $T_{i+1}^{\text{вал}}$ рассматриваются на $(i+2)$ -м шаге расчета как исходные.

Численное решение задачи было реализовано с помощью программного пакета Math Cad. Результаты расчета для одного цикла прокатки и для прокатки в течение 4-х часов представлены на рисунках 1 – 3.

На рисунке 1 показано изменение температуры оправки за один цикл прокатки при прямом ходе (10 с), в результате которого температура оправки увеличивается на 10^0 С. Интенсивность охлаждения оправки при обратном ходе (технологически рассчитано – 20 с) значительно ниже интенсивности ее нагрева и за время обратного хода снижается на $0,004 - 0,005^0$ С.

Вследствие незначительного теплосъема при теплообмене с окружающим воздухом происходит быстрое нарастание температуры оправки, достигающей примерно за 2 ч работы стана $600 - 650^0$ С (рис. 3). Далее, вследствие установившегося теплового баланса с окружающей средой, температура оправки стабилизируется и остается на одном уровне в течение всего дальнейшего времени. На рисунке 3 также показано изменение температуры валков и температуры заготовки на выходе из клетки. Очевидно, что с прогреванием оправки изменяется и температура конца прокатки, которая должна быть строго выдержана на определенном уровне, что влияет на свойства получаемого проката.

Анализ полученных результатов теплового режима работы стана показал необходимость наиболее интенсивного теплообмена, что требует использования дополнительных средств охлаждения. Для поддержания температуры оправки на уровне $200-250^0$ С система охлаждения должна обеспечивать интенсивность теплообмена с коэффициентом теплопередачи α не ниже $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, как это показано на рисунке 2. Конвективный теплообмен с воздухом обеспечивает $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, охлаждение водой – $\alpha = 103 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ [3]. Очевидно, что охлаждение в принудительном потоке воздуха позволит обеспечить требуемую интенсивность теплоотдачи при обратном ходе оправки, тем более что охлаждение воздухом, с точки зрения простоты, чистоты и культуры производства, является наиболее предпочтительным, однако сложность заключается в самих системах воздушного охлаждения, их возможностях, экономичности, конструктивных особенностях.

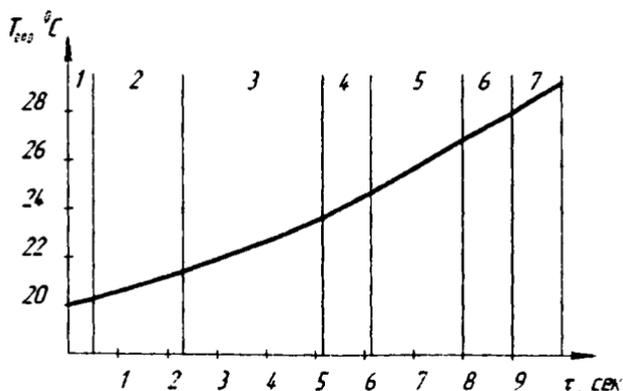


Рисунок 1 – Среднее изменение температуры оправки за один цикл прокатки заготовки (1-7 – этапы прохождения заготовки в рабочей клет)

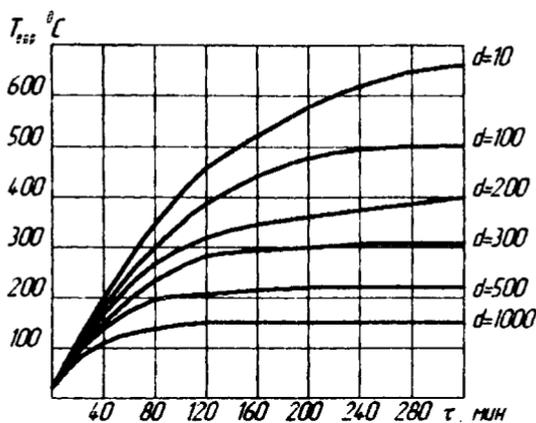


Рисунок 2 – Влияние интенсивности охлаждения оправки на ее рабочую температуру (α – коэффициент теплоотдачи)

В настоящее время все более широкое распространение находит охладительная техника с вихревым эффектом охлаждения, представляющим собой сложный газодинамический процесс, происходящий в пространственном турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа (эффект Ранка) [4, 5]. Схема вихревой трубы представлена на рисунке 4.

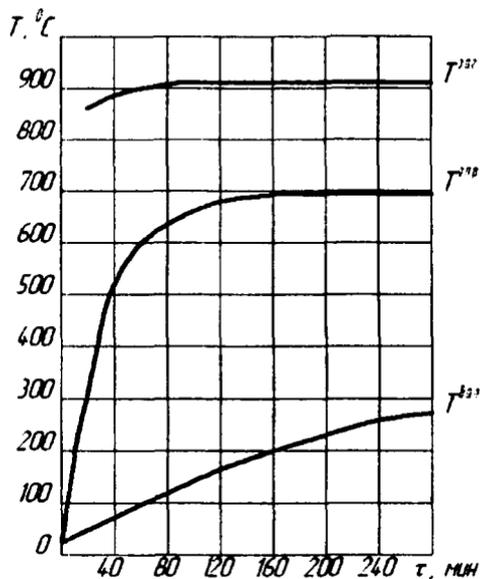


Рисунок 3 – Изменение температуры заготовки, оправки и валков при получении проката переменного профиля

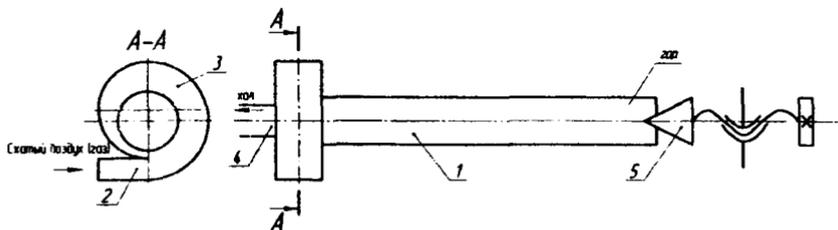


Рисунок 4 – Схема вихревой трубы

Она представляет собой гладкую цилиндрическую трубу 1, снабженную тангенциальным соплом 2, улиткой 3, диафрагмой 4 с осевым отверстием и дросселем 5. При втекании газа через сопло образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и отводят через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают

через дроссель в виде горячего потока. По мере прикрытия дросселя общий уровень давления в вихревой трубе повышается и расход холодного воздуха через отверстие диафрагмы увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температура холодного и горячего потоков также изменяется. По принципу разделения потоков воздуха работают промышленные вихревые холодильные камеры, вихревые термостаты, вакуум-насосы и т.д. Источником питания для них служит система сжатого воздуха, при этом на выходе холодного потока они обеспечивают температуру воздуха до -20°C .

Приведенные расчеты теплового режима работы прокатного стана для получения заготовок малолистовых рессор показывают, что применение вихревых охладителей для подстуживания оправки является малоэффективным. Согласно расчетам, проведенным по методике [3], для охлаждения оправки при ее холостом ходе на $6-10^{\circ}\text{C}$ потребуется приблизительно около 30 микрокондиционеров ВВП-20/1. Холодопроизводительность этих установок составляет порядка 1,3 – 1,8 кВт, в то время как для снижения температуры оправки за один обратный ход (20 с) на $6-10^{\circ}\text{C}$ требуется съем тепловой мощности порядка 50-60 кВт. При этом требуемый секундный расход сжатого воздуха согласно [3] будет составлять примерно 6-8 кг/с, что значительно повышает стоимость всего технологического процесса прокатки заготовок рессор.

Анализ полученных результатов теплового режима работы стана показал необходимость организации наиболее интенсивного теплообмена, что требует использования дополнительных средств охлаждения. Для поддержания температуры оправки на уровне $200-205^{\circ}\text{C}$ система охлаждения должна обеспечивать интенсивность теплообмена с коэффициентом теплопередачи α не ниже $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, как это показано на рисунке 3. Конвективный теплообмен с воздухом обеспечивает $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, охлаждение водой – $\alpha = 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Для обеспечения охлаждения оправки в пределах, необходимых для непрерывной работы прокатного стана в течение как минимум четырех часов, выбрана система охлаждения с соосными водяными потоками.

Такая система охлаждения конструктивно исполнена в виде двух концентричных водяных каналов: одного круглого, другого –

охватывающего. Такая схема, получившая название «труба в трубе», позволяет получать максимальный эффект охлаждения деформирующей оправки.

Однако, результаты работы предложенной системы охлаждения деформирующей оправки по схеме «труба в трубе» в течение десятилетней эксплуатации показали ряд нежелательных явлений. Во-первых, это обусловлено технологическими трудностями изготовления в оправке центрального водяного канала \varnothing 70 мм и длиной 1440 мм. Во-вторых, существующая система охлаждения деформирующей оправки водой с наличием центрального отверстия по всей ее длине хотя и обеспечивает температурный режим, но вследствие недостаточной толщины стенок охлаждающего канала по конструктивным особенностям и большим перепадам температур (на поверхности температура прокатываемого металла – 950 – 1100 °С, внутренние стенки охлаждающего канала водой 20 – 30 °С) приводит к возникновению трещин, т.е. к преждевременному выходу из строя дорогостоящей деформирующей оправки.

Поэтому в настоящее время ведутся работы по замене водяного охлаждения деформирующей оправки на воздушное, исключаяющее наличие центрального водяного канала и значительно упрощающее технологию ее изготовления.

Литература

1. Степаненко, А. В. Прокатка полос переменного профиля / А. В. Степаненко, В. А. Король, Л. А. Смирнова – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2001. – 180 с.

2. Патент 4076902 Республика Беларусь, В21Н7/00. Способ изготовления заготовок изделий с переменным по длине профилем и устройство для его осуществления / А. В. Степаненко, В. А. Король, Г. А. Исаевич; заявл. 01.07.86; опубл. 30.06.95 // Изобретения, полезные модели. Промышленные образцы. – 1995. – №1. – С. 30.

3. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – М., 1964. – 460 с.

4. Вихревой эффект и его промышленное применение // Материалы III всесоюзной научно-технической конференции. – Куйбышев, 1981. – 442 с.

5. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – М.: Машиностроение, 1969. – 183 с.