

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого»
г. Гомель, Беларусь

Маршрут волочения должен обеспечивать требуемое качество готовой проволоки, максимально возможную производительность, отсутствие обрыва проволоки и другие требования.

В данной работе приведен способ, позволяющий оптимизировать маршруты волочения стальной высокоуглеродистой проволоки с целью достижения рационального баланса между качеством проволоки и производительностью процесса волочения.

Route drawing must provide the required quality of the finished wire, the highest possible performance, continuity wire and other requirements.

This paper presents a method to optimize the routes drawing high carbon steel wire in order to achieve a rational balance between the quality and performance of the wire drawing process.

Маршрут волочения проволоки представляет собой ряд последовательных диаметров волок с постепенно уменьшающимся диаметром, через которые протягивается проволочная заготовка с уменьшением площади поперечного сечения. Маршрут волочения должен обеспечивать требуемое качество готовой проволоки, максимально возможную производительность, то есть скорость волочения, отсутствие обрыва проволоки и другие требования. Увеличение скорости волочения проволоки из высокоуглеродистой стали вызывает дополнительное упрочнение стали и как следствие снижение ее технологических свойств при дальнейшей переработке, например, при свивке в металлокорд. Таким образом, рост скорости волочения проволоки из высокоуглеродистой стали снижает качество получаемой проволоки. Поэтому возникает необходимость в оптимизации маршрутов волочения, с целью достижения рационального баланса между качеством проволоки и производительностью процесса волочения.

В данной работе приведен способ, позволяющий оптимизировать маршруты волочения стальной высокоуглеродистой проволоки с целью достижения требуемого баланса между качеством проволоки и производительностью ее волочения.

Для оптимизации по ресурсу пластичности можно использовать теорию разрушения, основанную на оценке предельной пластичности металла. В соответствии с теорией разрушения [1–16] предельная степень деформации, которую можно сообщить металлу при пластическом его формоизменении, определится из условия:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n (\Lambda_i / \Lambda_p)^{a_i}, \quad (1)$$

где Ψ – критерий предельной пластичности; n – число этапов деформирования к моменту разрушения проволоки; Λ_i – степень деформации сдвига на этапе деформирования; Λ_p – величина степени деформации до разрушения на этапе деформирования; a_i – эмпирический коэффициент, зависящий от схемы напряженного состояния.

Схема расчета ресурса пластичности по условию (1) следующая. В процессе определения компонентов напряженно-деформированного состояния в пластической области определяют интенсивность скоростей деформации сдвига $H(\tau)$ и коэффициент напряженного состояния $k = \sigma/T$, где σ – интенсивность нормальных напряжений, T – интенсивность касательных напряжений. Коэффициент k дает возможность определить по диаграммам пластичности величину степени деформации до разрушения Λ_p . Как показывают исследования [1–16], характер зависимости пластичности от показателя напряженного состояния отличается не только для вида металла, но и для одного металла в различном состоянии, зависящем от предшествующей обработки. Для удобства расчетов нужны аналитические формулы для расчета предельной деформации при различных значениях коэффициента k . Экспериментальные данные, представленные в работах [1–16] и связывающие Λ_p и k аппроксимировали по методу наименьших квадратов.

Диаграммы пластичности вместе с рассчитанными значениями напряжений и деформаций служат основой для выбора предельных (по условию разрушения). Степень использования ресурса пластичности определяется по переходам по зависимостям, связывающим Λ_p и k .

Определение величины Λ_i в выражении (1) связано с расчетом деформационно-кинематических и энергосиловых параметров процесса волочения проволоки по базовой и проектируемой технологии получения проволоки. Увеличение прочности проволоки приводит к увеличению суммарной деформации на последнем переделе, ограничению единичных обжатий, а также ужесточает требования к охлаждению проволоки в процессе волочения и качеству ее поверхности.

Улучшения качества поверхности и повышения пластичности проволоки можно достичь при максимальном использовании допустимого числа переходов и уменьшения скольжения проволоки по волочильным шайбам. Необходимо также использовать метод минимального абсолютного скольжения, когда относительное скольжение равномерно уменьшается до нуля к концу маршрута волочения.

Для оптимизации процесса волочения определяется базовое значение коэффициента запаса пластичности $\Psi_{\text{баз}}$ по формуле (1) для известного действующего процесса волочения.

Затем вводятся изменения в режимы волочения, и пересчитывается значение Ψ . Если после изменения режимов процесса волочения, Ψ уменьшается или остается равным относительно $\Psi_{\text{баз}}$, то такие изменения не приведут к потере качества проволоки, а если Ψ увеличится относительно $\Psi_{\text{баз}}$, то качество ухудшится вследствие истощения при волочении запаса пластичности и трещинообразования. При $\Psi \geq 1$ происходит обрыв проволоки.

Недостатком использования данного критерия является то, что он не учитывает влияние на свойства получаемой проволоки скорости волочения, т.е. учитывается только изменение качества получаемой проволоки, но не учитывается производительность волочения. Скорость холодного волочения не учитывается при расчете упрочнения стальной проволоки.

Известен критерий K , зависящий от максимальной температуры поверхности проволоки и ее скорости волочения, рассчитываемый по формуле [17]:

$$K = \frac{\left(\frac{T_{\text{max}}}{T_B} \right)^{50} + \left(\frac{V_B}{V} \right)^{15}}{2}, \quad (2)$$

где T_{max} – максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °C; V –

скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана, м/с; T_b – базовая температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °C; V_b – базовая скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана, м/с.

В соответствии с этим критерием при действующем маршруте волочения $K = 1$. Если изменения в режимах волочения вызывают повышение коэффициента K , то принимаемые изменения приводят к потере эффективности волочения проволоки и свивки из нее корда. Если изменения в режимах волочения вызывают понижение коэффициента K , то принимаемые изменения приводят к повышению эффективности волочения.

Температура поверхности проволоки в маршруте волочения влияет на качество производимой проволоки, т.к. температура поверхности проволоки посредством деформационного старения структуры высокоуглеродистой стали определяет запас пластичности проволоки и как следствие величину обрывности металлокорда, свиваемого из этой проволоки после волочения.

Критерий K обладает недостатком, заключающимся в том, что качество проволоки оценивается только температурой поверхности проволоки при волочении. В действительности имеется целый ряд других параметров, влияющих на качество проволоки. В этой связи критерий K следует признать оценкой производительности волочения, ограниченной температурой поверхности проволоки.

При выборе наиболее оптимального маршрута волочения проволоки нужно учитывать соотношение качества проволоки, представленного запасом пластичности проволоки, и производительности процесса волочения, представленной скоростью волочения. Для выполнения этого вида оптимизации маршрута волочения разработан оценочный коэффициент W :

$$W = \left(\frac{1 - \psi}{K} \right) \cdot 100, \quad (3)$$

где ψ – критерий предельной пластичности, рассчитываемый по формуле (1); K – критерий, рассчитываемый по формуле (2).

Способ оптимизации маршрута волочения проволоки по оценочному коэффициенту W проводится по следующей разработанной методике.

Вначале рассчитывается базовый процесс волочения заданного диаметра и свойства проволоки, который обеспечивает относительно стабильное удовлетворительное качество проволоки.

Исходные данные к расчету:

- ряд последовательных диаметров волок для рассчитываемого маршрута волочения d_p , мм;
- полууглы конусов рабочих зон для каждой волоки α_p , рад;
- коэффициенты длины калибрующей зоны волоки m_p , определяющие длину этой зоны d_{pm} ;
- скорость проволоки для последней волоки V_n , м/с;
- величина противонапряжения проволоки для первой волоки σ_{vp} , МПа;
- количество витков проволоки на тяговой шайбе для переходов волочения, z_i ;
- коэффициент контактного трения в волоке, f_i ;
- коэффициент контактного трения между витками проволоки и поверхностями тяговых шайб f_u ;
- значения максимальных температур в очаге деформации для каждой волоки, полученные с помощью численного моделирования или аналитического расчета процесса волочения T_i , °C;
- зависимость для определения сопротивления пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения $\sigma_{si} = f(\epsilon \Sigma_i)$, МПа, где $\epsilon \Sigma_i$ – итоговая логарифмическая деформация проволоки для i -го перехода волочения; зависимость может быть получена аппроксимацией экспериментальной кривой растяжения проволочной заготовки;
- сопротивление пластической деформации проволочной заготовки σ_{so} , МПа;
- скорость деформирования ξ_p , использованная при получении зависимости $\sigma_{si} = f(\epsilon \Sigma_i)$, 1/с;

– функция для коэффициента влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации проволоки $Z_i = f(\xi_i)$, где ξ_i – скорость деформации проволоки для каждого i -го перехода волочения; функция может приниматься из справочных данных или из экспериментальных зависимостей;

– зависимости для диаграмм пластичности $\Lambda_{pi} = f(k_i)$, соответствующие разной степени упрочнения обрабатываемой проволоки, где Λ_{pi} – интенсивность сдвиговой деформации разрушения, k_i – коэффициент напряженного состояния очага деформации для каждого перехода волочения; зависимости могут быть получены аппроксимацией экспериментальных кривых диаграмм пластичности;

– паспортные кинематические вытяжки для тяговых шкивов μ_i .

Для расчета базового процесса с целью поиска значения степенного коэффициента a_o и относительных скольжений для тяговых шкивов определяются следующие параметры [16]:

Вытяжка:

$$\mu_i = \frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2}, \quad (4)$$

Скорость волочения:

$$V_{i-1} = \frac{V_i}{\mu_i}, \quad \text{мм/с} \quad (5)$$

Длина очагов деформации:

$$l_i = \frac{(d_{i-1} - d_i)}{2 \cdot \tan(\alpha_i)}, \quad \text{мм} \quad (6)$$

4. Время прохода элементарной точки поверхности проволоки через зоны деформации волок:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i}, \quad \text{с} \quad (7)$$

Относительное обжатие проволоки:

$$\delta_i = \frac{(d_{i-1})^2 - (d_i)^2}{(d_{i-1})^2} \quad (8)$$

Скорость деформации:

$$\xi_i = \frac{\delta_i}{t_i}, \quad 1/\text{с}. \quad (9)$$

Итоговая логарифмическая деформация для каждой волоки:

$$\varepsilon \Sigma_i = \ln \left[\frac{(d_0)^2}{(d_i)^2} \right]. \quad (10)$$

8. Сопротивление пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного упрочнения σ_{si} определяется по зависимости $\sigma_{si} = f(\varepsilon \Sigma_i)$, МПа.

9. Коэффициент влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации Z_i . В зависимости от значений максимальных температур в очаге деформации выбирается соответствующая формула из справочных данных, по которой ведется расчет параметра Z .

10. Сопротивление пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного и скоростного упрочнения σ_{si} :

$$\sigma_{si} = Z_i \cdot \sigma_{si}, \quad \text{МПа} \quad (11)$$

11. Модуль упрочнения проволоки:

$$w_i = \frac{\sigma_{si} - \sigma_{s(i-1)}}{\mu_i - 1}, \quad \text{МПа} \quad (12)$$

12. Коэффициент, определяющий степень противонапряжения проволоки:

$$K_i = e^{2\pi \cdot z_{\theta+1} \cdot f}, \quad (13)$$

13. Напряжение волочения:

$$\sigma_{vi} = \sigma_{si} (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma_{s(i-1)}) \left[(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}} - 1 \right]}{\frac{f}{\tan(\alpha_i)} \cdot (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} - \frac{\sigma_{s(i-1)} - \left(\frac{\sigma_{v(i-1)}}{K_i} \right)}{(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} + 4m_i f \sigma_{si}, \text{ МПа} \quad (14)$$

14. Коэффициент запаса волочения:

$$\gamma_i = \frac{\sigma_{vi}}{\sigma_{si}} \quad (15)$$

15. Радиальное нормальное напряжение в очаге деформации:

$$\sigma_i = -(\sigma_{si} - \sigma_{vi}), \text{ МПа} \quad (16)$$

16. Среднее напряжение очага деформации:

$$\sigma_{\sigma i} = \frac{2\sigma_i + \sigma_{vi}}{3}, \text{ МПа} \quad (17)$$

17. Коэффициент напряженного состояния очага деформации:

$$k_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_{\sigma i}}{\sigma_{si}} \quad (18)$$

18. Интенсивность сдвиговой деформации разрушения Λ_{pi} . Определяется из зависимостей $\Lambda_{pi} = f(k_i)$ для диаграмм пластичности.

19. Интенсивность деформации сдвига в очаге деформации:

$$\Lambda_i = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \ln \left[\frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2} \right] \quad (19)$$

20. Степенной коэффициент a_0 для коэффициента запаса пластичности ψ определяется из следующего уравнения:

$$\psi_{\text{баз}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right)^{(a_0)^{(1+0.2384_i)}} \quad (20)$$

где n - количество волок в маршруте волочения.

21. Скорость тяговых шайб:

$$B_{i-1} = \frac{B_i}{\mu n_i}, \text{ мм/с} \quad (21)$$

22. Относительное скольжение проволоки по поверхности тяговых шайб:

$$C_i = \frac{B_i - V_i}{B_j}. \quad (22)$$

23. По формулам (2) и (3) рассчитываются базовые значения критерия $K_{\text{баз}}$ и оценочного критерия $W_{\text{баз}}$.

На этом этапе расчет базового процесса заканчивается.

Далее вводятся предлагаемые изменения в режим волочения базового процесса с целью его оптимизации. По аналогии с базовым процессом формируются исходные данные для измененного процесса с изменением предлагаемых для оптимизации режимов волочения с сохранением величины конечного диаметра проволоки и ее свойств в конце волочения.

Расчет измененного процесса выполняется в соответствии с измененными исходными данными по пунктам 1–23 расчета базового процесса с добавлением следующих пунктов:

24. Степень коэффициента запаса пластичности:

$$a_i = (a_0)^{(1+0,238k_i)} \quad (23)$$

25. Частный коэффициент запаса пластичности для каждого прохода волочения:

$$\psi_i = \left(\frac{\Lambda_i}{\Lambda_{p_i}} \right)^{a_i} \quad (24)$$

26. Коэффициент запаса пластичности для всего маршрута волочения:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (25)$$

27. Выполняют общую оценку оптимизации маршрута волочения с помощью оценочного критерия W , рассчитываемого по формуле (3).

Если изменения в режимах волочения вызывают повышение коэффициента $W \geq W_{\text{баз}}$, то принимаемые изменения приводят к повышению эффективности волочения проволоки и свивки из нее металлокорда. Если изменения в режимах волочения вызывают понижение коэффициента $W \leq W_{\text{баз}}$, то принимаемые изменения приводят к понижению эффективности волочения и свивки. Если $W \leq 0$ происходит обрыв проволоки.

Все параметры, рассчитанные по формулам (4–15) должны находиться в допустимых пределах, заданных техническими характеристиками волочильного оборудования и свойствами обрабатываемой стали.

Пример применения способа оптимизации маршрута волочения ультравысокопрочной проволоки (УТ) диаметром 0,35 мм из стали 96, микролигированной хромом на волочильном стане тонкого волочения НТ12.6.

В соответствии с разработанной методикой были заданы исходные данные:

– ряд последовательных диаметров волок действующего маршрута волочения d_i , мм: 2,190–2,150–1,940–1,750–1,575–1,420–1,278–1,154–1,050–0,956–0,870–0,795–0,725–0,663–0,607–0,558–0,514–0,471–0,432–0,396–0,370–0,349;

– полууглы конусов рабочих зон для каждой волоки: $\alpha_i=0,105$ рад;

– коэффициент длины калибрующей зоны волоки: $m=21$;

– скорость проволоки для последней волоки: $V_n=5$ м/с;

– величина противонапряжения проволоки для первой волоки: $\sigma_{v0}=10$ МПа;

– количество витков проволоки на тяговой шайбе для переходов волочения, z_i : для 0-го шкива - 0,25 витка; для 1–3 шкивов 3,5 витка; для 4–6 шкивов 2,5 витка; для 7–10 шкивов 2,5 витка; для 11–14 шкивов 2,5 витка; 15–20 шкивов 1,5 витка;

– коэффициент контактного трения в волоке: $f=0,05$;

– коэффициент контактного трения между витками проволоки и поверхностями тяговых шайб: $f_{ш}=0,07$.

Требуется найти максимально эффективный вариант изменения маршрута волочения.

По формулам (4–22), (2) рассчитаны параметры волочения для всех переходов волочения.

В действующем маршруте волочения с 21 волокой, при скорости волочения 5 м/с все параметры находятся в допустимых пределах, за исключением максимальной температуры поверхности проволоки, равной 580 °С на 21-ой волоке. Этот маршрут принимаем базовым. По формуле (3) определен оценочный критерий $W_{\text{баз}}$. Для маршрута характерно: $W_{\text{баз}} = -7,9$ при $K_{\text{баз}}=1$, $\psi_{\text{баз}}=1,08$, т.е. при данном режиме волочения возможен обрыв проволоки.

Проводим оптимизацию базового маршрута волочения, изменяя различные параметры волочения.

Например, в маршрут волочения вводятся шесть сдвоенных волок: вместо волоки диаметром 1,154 мм вводится сдвоенная волока с диаметрами 1,174 и 1,154 мм; вместо волоки диаметром 0,663 мм – сдвоенная волока с диаметрами 0,676 и 0,663 мм; вместо волоки диаметром 0,558 мм – сдвоенная волока с диаметрами 0,569 и 0,558 мм; вместо волоки диаметром

0,471 мм – сдвоенная волока с диаметрами 0,480 и 0,471 мм; вместо волоки диаметром 0,396 мм – сдвоенная волока с диаметрами 0,402 и 0,396 мм; вместо волоки диаметром 0,349 мм – сдвоенная волока с диаметрами 0,357 и 0,349 мм. При скорости волочения 5 м/с все параметры, рассчитанные по формулам (4–25), (2), находятся в допустимых пределах, за исключением максимальной температуры поверхности проволоки, равной 570 °С на 25-ой волоке. Максимальная температура проволоки в измененном маршруте волочения со сдвоенными волоками снизилась по сравнению с базовым маршрутом волочения на 10 °С с 580 в базовом маршруте до 570 °С в измененном маршруте, что указывает на рост качества проволоки в измененном маршруте. Для измененного маршрута характерно $W=24,9$ при $K=0,71$, $\psi=0,823$. Увеличение оценочного критерия $W=24,9$ по сравнению с базовым значением $W_{\text{баз}} = -7,9$ при $K_{\text{баз}}=1$, $\psi_{\text{баз}}=1,08$ указывает на повышение качества проволоки при сохранении производительности волочения. Таким образом, введение 6 сдвоенные волоки повысило качество получаемой проволоки, но температура поверхности проволоки осталась выше допустимой.

С целью дальнейшего уменьшения температуры поверхности проволоки на 25 волоке и роста качества проволоки предпринята попытка снижения скорости волочения до 4 м/с. Температура поверхности проволоки уменьшилась до 528 °С, что указывает на рост качества проволоки. Для этого маршрута волочения характерно: $W=1,2$ при $K=14,21$, $\psi=0,825$. Снижение оценочного критерия с $W=24,9$ до $W=1,2$ указывает на снижении волочения эффективности волочения по сравнению с предыдущим вариантом. Таким образом, простое снижение скорости волочения в технологии волочения не повышает эффективности производства проволоки из-за уменьшения производительности, хотя вызывает некоторый рост качества проволоки.

Далее для уменьшения температуры поверхности проволоки на 25-ой волоке диаметром 0,370 мм заменяем ее на сдвоенную волоку с диаметрами 0,377 и 0,370 мм, т.е. вводим уже 7 сдвоенных волок. При скорости волочения 5 м/с все параметры находятся в допустимых пределах, включая максимальную температуру поверхности проволоки, равную 540 °С в 23-ей волоке. Для маршрута характерно $W=38,9$ при $K=0,514$, $\psi=0,8$. Увеличение оценочного критерия W до 38,9 говорит о повышении эффективности волочения по сравнению со всеми предыдущими вариантами волочения. При этом сохранена производительность базового варианта.

С целью повышения производительности без значительной потери качества маршрута волочения с 7-ю сдвоенными волоками можно повысить скорость волочения с 5 м/с до 5,3 м/с. В этом случае максимальная температура поверхности проволоки при волочении составит 543 °С. Для маршрута характерно $W=81,2$ при $K=0,247$, $\psi=0,7995$. Увеличение оценочного критерия W указывает на повышение эффективности волочения. Дальнейшее увеличение скорости приводит к повышению максимальной температуры поверхности проволоки и, как следствие, к снижению ее качества. Режим волочения с 7-ю сдвоенными волоками при скорости волочения 5,3 м/с следует признать наиболее эффективным по сравнительно с другими рассмотренными вариантами. Он обеспечивает повышение производительности получаемой проволоки без существенной потери ее качества.

Способ оптимизации маршрута волочения высокоуглеродистой проволоки с помощью оценочного критерия позволяет оптимизировать действующие и разрабатывать новые маршруты волочения с целью повышения производительности волочения без потери качества проволоки или с заданным балансом между производительностью и качеством волочения.

Список использованных источников

1. Одинг, И.А. Изв. АН СССР, ОТН, №3/ И.А. Одинг. – 1960, 3–6 с.
2. Механика: сб. №5/ Гильман Дж. Дж. – М.: ил, 1962, 99–151 с.
3. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машины на прочность/ С.В. Серенсен, В.П. Кочаев, Р.М. Шнейдерович – М.: Машигиз, 1963. – 451с.
4. Качанов, Л.М. Теория ползучести/ Л.М. Качанов – М.: Физматгиз, 1960. – 455 с.
5. Теоретические основы конструирования машин сб. №1. / Я.Б. Фридман – М.: Машигиз, 1957. – 257–281 с.

6. Булычев, Д.К. ФММ, т.18, вып. 3/ Д.К. Булычев, Б.И. Береснев, М.Г. Гайдуков, 1964. – 433–438 с.
7. Колмогоров, В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушения./ В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1970 – 162 с.
8. Береснев, Б.И. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б.И. Береснев, Е.Д. Мартынов, К.П. Радионов – М.: Наука, 1970. – 162 с.
9. Бриджмен, П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва/ П.В. Бриджмен – М.: Ил., 1955. – 444 с.
10. Механические свойства материалов под высоким давлением, вып. 1 и 2 / под. ред. Х.Л. Пью – М.: Мир, 1973. – 296 и 374 с.
11. Богатов, А.А. Известия ВУЗов. Черная металлургия/ А.А. Богатов, В.Л. Колмогоров, Г.А. Матвеев – 1970 – вып. 8 – 76–80 с.
12. Колмогоров, В.Л. ФММ/ В.Л. Колмогоров, В.И. Уральский, Г.Д. Козлов – 1967 – вып. 1, т. 23. – 170–172 с.
13. Мигачев, Б.А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов: Справочник / Б.А. Мигачев, А.И. Потапов – М.: Металлургия, 1980 – 88 с.
14. Филоненко-Бородич, М.М. Механические теории прочности/ М.М. Филоненко-Бородич – М.: Изд-во МГУ, 1961. – 91 с.
15. Сторожев, М.В. Теория обработки материалов давлением: Учебник для вузов. Изд. 4–е, перераб. и доп./ М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: «Машиностроение», 1977. – 423 с. с ил.
16. Бобарикин Ю.Л. Оптимизация тонкого волочения высокоуглеродистой стальной проволоки/ Ю.Л. Бобарикин, М.Н. Верецагин. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2011. – 163с.
17. Бобарикин Ю.Л. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки/ Ю.Л. Бобарикин, С.В. Авсейков, А.В. Веденеев, И.Н. Радькова// Ежеквартальный научно-производственный журнал «Литье и металлургия», 3 выпуск – Минск: Изд-во БНТУ, 2012. – 205–209с.

Статья поступила в редакцию 23.04.2015