

УДК 669.15

Лабер К.
Кочуркевич Б.
Гарстка Т.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КАТАНКИ ДИАМЕТРОМ 5,5 ММ ИЗ СТАЛИ МАРКИ С70D

Существует большое количество способов повышения механических свойств горячекатанных стальных изделий. Чаще всего желаемый эффект достигается путем подбора соответствующих параметров деформации и охлаждения. Оптимальным решением является объединение этих двух процессов, которое связано с необходимостью высокоточного контроля процесса прокатки с учетом проходящих в стали процессов [1]. Зависимость свойств готовых изделий от параметров процесса прокатки достаточно сложная, а влияние каждого параметра процесса зависит от множества факторов. Достаточно трудно однозначно предвидеть эффект от корректировки параметров деформации [2].

В сталях, поддаваемых термомеханической обработке, протекают сложные процессы, приводящие к формированию характерной структуры с высоким комплексом прочностных и пластических свойств. В первую очередь происходит измельчение структуры и увеличение плотности дефектов. По мнению авторов работы [3], термомеханическая обработка позволяет повысить прочностные свойства изделий на 20...30% и может применяться для всех марок стали.

Опубликовано большое количество работ, в которых наблюдается положительное влияние процесса контролируемой прокатки и контролируемого охлаждения на микроструктуру и свойства готовых изделий [4–8].

Целью представленных в работе исследований было определение влияния разных режимов термомеханической обработки на микроструктуру и свойства катанки диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали. Представленные в работе исследования проведены для стали марки С70D с химсоставом, соответствующим норме [9].

На первом этапе исследований проведен анализ применяемой традиционной технологии прокатки катанки диаметром 5,5 мм из стали марки С70D на одном из промышленных предприятий.

На втором этапе исследований, на основании термокинетических и изотермических диаграмм горячей деформации аустенита исследуемой стали, разработанных на кафедре обработки металлов давлением и инженерии безопасности Ченстоховского технологического университета, предложены коррективы применяемой технологии, которые заключаются, главным образом, в изменении температуры конца прокатки и условий охлаждения изделия.

Следующим этапом исследований было проведение промышленных исследований процесса прокатки по предложенным параметрам термомеханической обработки.

На последнем этапе исследований были проведены металлографический анализ структуры и испытания на механические свойства материала после разных режимов прокатки.

Представленные в работе исследования проведены для технологических условий одного из самых современных станков, оборудованного системой многоэтапного контролируемого охлаждения (рис. 1).

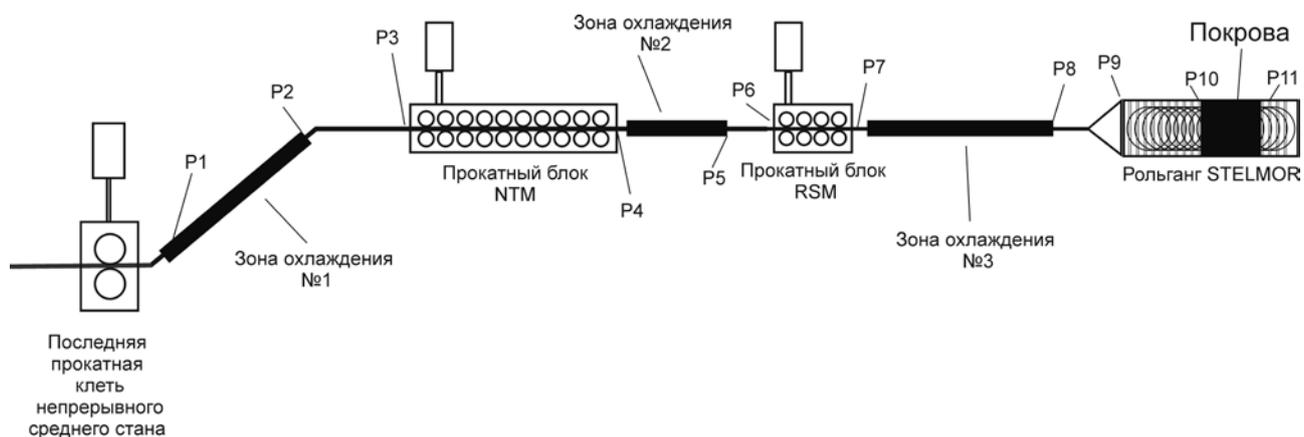


Рис. 1. Общая схема размещения оборудования на анализируемом стане:
P1-P11 – места измерения температуры деформируемой полосы

Из анализа применяемой на данный момент технологии прокатки катанки диаметром 5,5 мм из стали С70D [8] видно, что охлаждение катанки проходит только во второй зоне охлаждения. Точные значения анализированных параметров процесса контролируемого охлаждения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры процесса многоэтапного охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали С70D (актуальная технология)

Зона охлаждения		1	2	3
Давления P, [бар]		0,1	2,8	0,9
Поток F, [л/мин]		234	1410	207
Температура T, [°C]	вход	794 (P1)	992	914
	выход	909 (P2)	914 (P5)	920 (P8)

где: () – места измерения температуры полосы на рис. 1

Примерное изменение температуры поверхности полосы в зоне охлаждения №1 представлено на рис. 2.

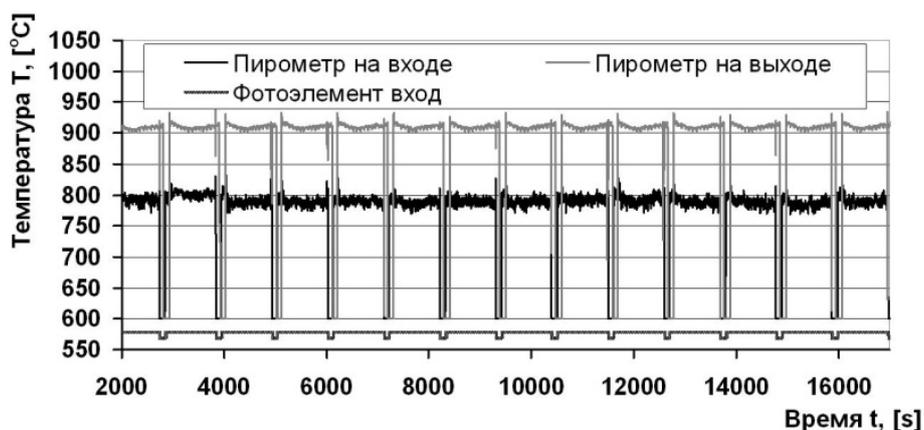


Рис. 2. Изменение температуры поверхности полосы в зоне охлаждения №1

Точные значения средней температуры поверхности полосы при её прохождении через соответствующее оборудование прокатного потока, зарегистрированные с помощью термовизорной камеры ThermaCAM SC640, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Измеренные значения температуры полосы в процессе прокатки катанки из стали С70D диаметром 5,5 мм (согласно схеме на рис. 1, актуальная технология)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Температура поверхности полосы, °С	925	872	880	970	886	895	891	889	899	504	438

Примерная термограмма распределения температуры деформируемой стали на входе в рольганг STELMOR представлена на рис. 3.

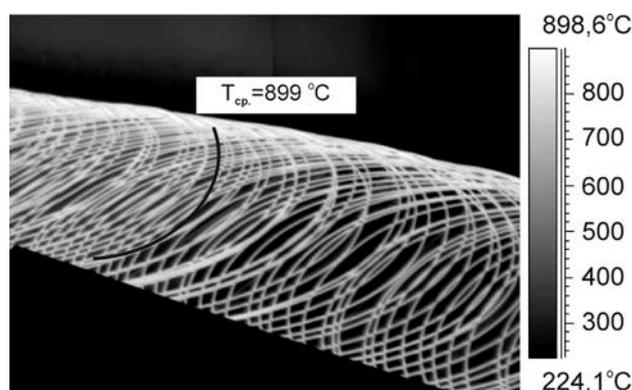


Рис. 3. Термограмма распределения температуры катанки из стали С70D на входе в рольганг STELMOR (P9 – согласно схеме на рис. 1, актуальная технология)

На основании данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что средняя температура поверхности катанки из стали С70D на входе в рольганг STELMOR составила примерно 900°C. Охлаждение анализируемой марки стали на линии STELMOR длилось 33 секунды ускоренно при открытых покровах рольганга STELMOR и включенных вентиляторов. В результате охлаждения температура катанки снизилась до 500°C. На следующем этапе охлаждение проводилось под покровами при включенных вентиляторах в течение 39 секунд. В результате этого этапа охлаждения температура поверхности катанки составила 440°C. Далее катанка была сформирована в мотки.

Металлографический анализ (рис. 4) выявил перлитную структуру катанки с выделениями дисперсного феррита по границам перлитных колоний. Среднее расстояние между пластинками цементита в стали составило 0,65 мкм.

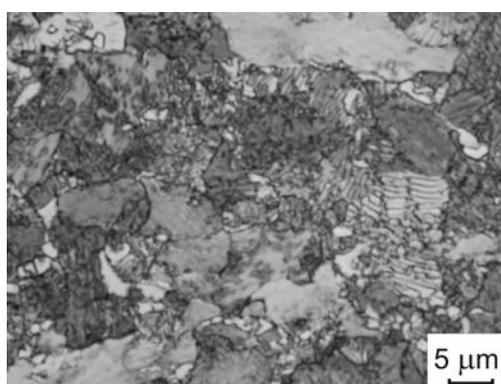


Рис. 4. Микроструктура высокоуглеродистой стали С70D – актуальная технология

Испытания на мехсвойства исследуемой катанки (рис. 5, табл. 3) показали, что среднее значение границы пластичности стали составило 636 МПа, а среднее значение прочности при растяжении – 1021 МПа. Относительное удлинение и сужение составило 11% и 53% соответственно.

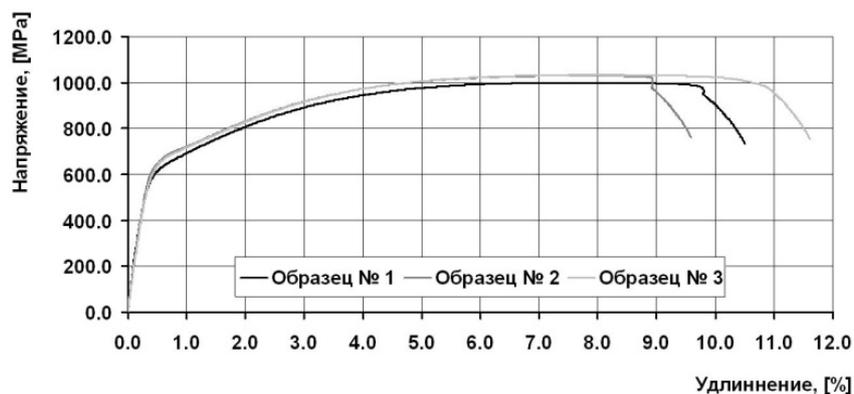


Рис. 5. Примерные кривые растяжения высокоуглеродистой стали С70D, актуальная технология

Таблица 3

Средние значения механических свойств катанки из высокоуглеродистой стали С70D, деформированной по актуальной технологии

Предел пластичности $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
636	1021	10,57	53,08

Следующим этапом исследований было определение параметров термомеханической обработки на основании термокинетических и изотермических диаграмм горячей деформации аустенита исследуемой стали с учетом технологических условий анализируемого стана (табл. 4).

Таблица 4

Скорректированные параметры термомеханической обработки высокоуглеродистой стали С70D

Режим	Зона охлаждения	Давление Р, бар	Поток F, л/мин	Температура Т, °С		Охлаждение STELMOR °C/s
				Вход	Выход	
1	1	1,27	1670	951	867	2,5
	2	6	1543	1036	830	
	3	0,37	419	830	844	
2	1	1,06	1339	955	882	5,7
	2	6,04	1556	1044	819	
	3	0,38	425	819	842	
3	1	0,88	1028	948	880	4,7
	2	6,02	1549	1040	830	
	3	1,24	1012	830	787	
4	1	0,96	688	946	898	4,9
	2	6,78	1820	1052	766	
	3	0,70	713	766	755	

Анализ реальных условий производства катанки на анализируемом стане показал, что температура конца прокатки из высокоуглеродистой стали в зависимости от конечного диаметра катанки находится в диапазоне 880...950°С. На основании термокинетической диаграммы горячей деформации аустенита анализируемой стали температура конца прокатки принято 900°С. При построении диаграмм горячей деформации аустенита принят цикл трех обжатий $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,2$ со скоростью деформации 10 с^{-1} при температурах 970°С, 930°С и 900°С с перерывами между обжатиями 0,2с. Скорость деформации после охлаждения составила 0,1...100°С/сек. После деформации и охлаждения образцы поддавали металлографии-

ческим исследованиям и измерениям твердости по Виккерсу. В результате проведенных исследований получены дилатограммы кинетики фазовых превращений горячедеформированного аустенита. Анализ дилатограмм позволил определить характерные для исследуемой марки стали температуры, а полученные данные позволили получить диаграмму охлаждения горячедеформированного аустенита (рис. 6).

Для исследуемой стали максимальные исследуемые скорости охлаждения (80 и 100 °C/сек) позволили получить мартенситную структуру с твердостью 836...897 HV. После охлаждения со скоростью 0,1...5°С/сек получена перлитная структура с сеткой феррита по границам. В перлитно-ферритной структуре не выявлено полосчатости. Проведенные исследования позволили определить диапазон скоростей охлаждения после деформации, обеспечивающих получение перлитно-ферритной структуры. Наиболее благоприятная скорость охлаждения составляет от 1 до 5°С/сек.

В табл. 5 представлены результаты мехиспытаний для предложенных режимов процесса прокатки катанки из стали С70D.

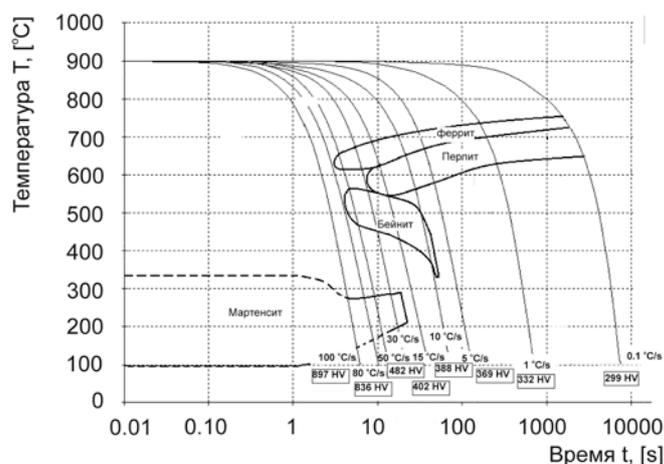


Рис. 6. Примерная диаграмма горячей деформации аустенита высокоуглеродистой стали С70D

Таблица 5

Механические свойства катанки из высокоуглеродистой стали С70D, деформированной по новым режимам

Режим	Предел пластичности $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
1	675	1009	14,72	40,70
2	756	1096	15,05	45,90
3	717	1070	17,25	51,55
4	741	1085	15,72	52,43

Из результатов, представленных в табл. 5, видно, что все предложенные режимы позволили получить более высокий уровень механических свойств по сравнению с применяемой технологией. Прокатка по режиму №1 позволила повысить уровень пластических свойств стали С70D на 6% при небольшом снижении предела прочности (на 1%). К тому же наблюдалось повышение относительного удлинения на 42% и уменьшение относительного сужения на 23% по сравнению с применяемой технологией прокатки.

Катанка, деформированная по режиму №2, характеризовалась на 19% более высокими пластическими свойствами, снижение предела прочности в данном случае составило 7%. Относительное удлинение увеличилось на 45%, а относительное сужение снизилось на 14%.

Термомеханическая обработка по режиму №3 позволило повысить предел пластичности на 13% при снижении предела прочности на 5%. В этом случае относительное удлинение повысилось на 66%, а относительное сужение снизилось на 3%.

После деформации по режиму №4 получено повышение предела пластичности исследуемой стали на 17% и относительного удлинения на 52%, при снижении предела прочности на 6% и относительного сужения на 1% по сравнению с актуальной технологией.

На рис. 6 представлены микроструктуры катанки из стали С70D деформированной по режимам №2 и №4.

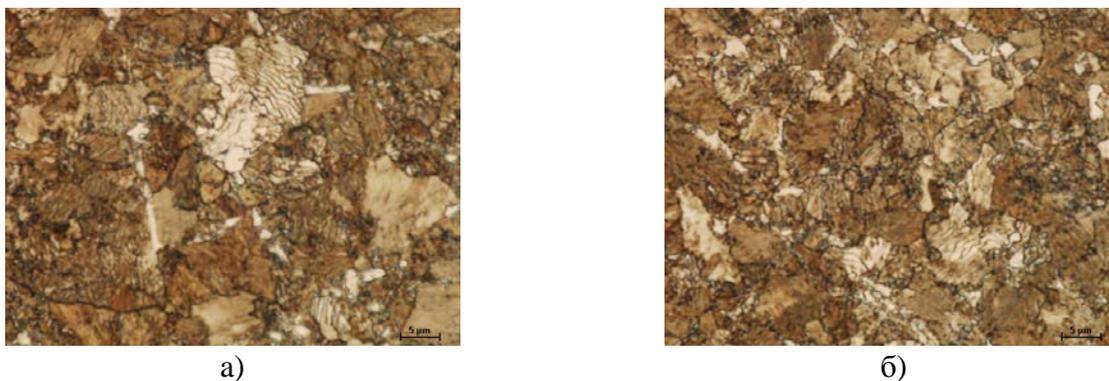


Рис. 6. Микроструктура высокоуглеродистой стали С70D после термомеханической обработки: а – режим №2; б – режим №4

На основании металлографического анализа катанки из высокоуглеродистой стали С70D можно сделать вывод о том, что полученные перлитно-ферритные структуры характеризуются меньшим расстоянием между пластинками цементита. Наименьшими расстояниями характеризуется катанка, деформированная по режиму №2 (0,50 мкм) и режиму №4 (0,40 мкм). Снижение данного параметра должно улучшить пластичность катанки из высокоуглеродистой стали С70D и облегчить деформацию в следующем переделе – холодном волочении.

ВЫВОДЫ

На основании результатов исследования влияния режимов термомеханической обработки на структуру и свойства катанки из высокоуглеродистой стали С70D можно сделать следующие выводы:

- актуальная технология производства катанки диаметром 5,5 мм из стали С70D обеспечивает получение готового изделия с пределом пластичности 636 МПа, пределом прочности на растяжение 1021 Мпа, относительным удлинением 11% и относительным сужением 53%.
- все предложенные режимы процесса прокатки позволили повысить уровень механических свойств исследуемой высокоуглеродистой стали.
- по мнению авторов, наиболее оптимальной является обработка по режиму №2, которая позволяет получить более высокие пластические свойства стали (предел пластичности на 19% выше и относительное удлинение на 45%) при небольшом снижении прочностных свойств (предел прочности на растяжение на 7%, относительное сужение на 14%) по сравнению с традиционной технологией.
- применение скорректированных режимов термомеханической обработки позволяет снизить расстояние между пластинками цементита в перлите с 0,65 до 0,4 мкм.
- все предложенные режимы термомеханической обработки, с точки зрения энергосиловых параметров и КПД многоэтапного контролируемого охлаждения, можно реализовать в промышленных условиях на реальном прокатном стане.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Научная работа профинансирована Государственным центром исследований и развития в 2013...2016 годах в рамках Проекта прикладных исследований №PBS2/A5/0/2013.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wusatowski R. Bars, Bars in Coils, Wire-Rod, Rolling 2000 / R. Wusatowski // 2nd European Rolling Conference Vasteras. Sweden, 2000.
2. Pietrzyk M. Ocena wrażliwości mikrostruktury i własności mechanicznych blach grubych na zmiany parametrów technologicznych procesu walcowania na gorąco / M. Pietrzyk, J. Nowak, D. Svetlichnyj // *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 1999. – №5. – P. 264.
3. Przybyłowicz K. *Metaloznawstwo* / K. Przybyłowicz // Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
4. Effect of controlled rolling and cooling on the microstructure and mechanical properties of 60Si2MnA spring steel rod / J. H. Ai, T. C. Zhao, H. J. Gao, Y. H. Hu, X. S. Xie // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. – Vol. 160. – P. 390–395.
5. Campbell P. C. *Microstructural Engineering Applied the Controlled cooling of Steel Wire Rod: Part 2.: Microstructural Evolution and Mechanical Properties Correlations*/ P. C. Campbell, E. B. Hawbolt, J. K. Brimacombe // *Metallurgical Transactions A*. 1991. – Vol. 22A. – P. 2779–2790.
6. Laber K. Wpływ warunków przyspieszonego chłodzenia w ciągu walcowniczym na mikrostrukturę prętów okrągłych gładkich o średnicy 30 mm/ K. Laber, H. Dyja, M. Kwapisz // *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 2001. – №5. – P. 392–395.
7. Laber K. Wpływ zastosowania walcowania normalizującego prętów okrągłych gładkich na mikrostrukturę gotowego wyrobu/ K. Laber, H. Dyja // *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 2009. – №11. – P. 799–803.
8. Laber K. Analysis of the Industrial Conditions of the Multi-Stage Cooling Process of the 5.5 mm in Diameter Wire Rod of C70D High-Carbon Steel / K. Laber, H. Dyja, B. Koczurkiewicz // *Materials Testing*, 2015. – №57.
9. PN-EN ISO 16120-2:2012: Walcówka ze stali niestopowej przeznaczona do produkcji drutu – Część 2: Wymagania dla walcówki ogólnego przeznaczenia, Polski Komitet Normalizacyjny, 2012.

REFERENCES

1. Wusatowski R. Bars, Bars in Coils, Wire-Rod, Rolling 2000 / R. Wusatowski // 2nd European Rolling Conference Vasteras. Sweden, 2000.
2. Pietrzyk M. Ocena wrażliwości mikrostruktury i własności mechanicznych blach grubych na zmiany parametrów technologicznych procesu walcowania na gorąco / M. Pietrzyk, J. Nowak, D. Svetlichnyj // *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 1999. – №5. – P. 264.
3. Przybyłowicz K. *Metaloznawstwo* / K. Przybyłowicz // Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
4. Effect of controlled rolling and cooling on the microstructure and mechanical properties of 60Si2MnA spring steel rod / J. H. Ai, T. C. Zhao, H. J. Gao, Y. H. Hu, X. S. Xie // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. – Vol. 160. – P. 390–395.
5. Campbell P. C. *Microstructural Engineering Applied the Controlled cooling of Steel Wire Rod: Part 2.: Microstructural Evolution and Mechanical Properties Correlations*/ P. C. Campbell, E. B. Hawbolt, J. K. Brimacombe // *Metallurgical Transactions A*. 1991. – Vol. 22A. – P. 2779–2790.
6. Laber K. Wpływ warunków przyspieszonego chłodzenia w ciągu walcowniczym na mikrostrukturę prętów okrągłych gładkich o średnicy 30 mm/ K. Laber, H. Dyja, M. Kwapisz // *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 2001. – №5. – P. 392–395.
7. Laber K. Wpływ zastosowania walcowania normalizującego prętów okrągłych gładkich na mikrostrukturę gotowego wyrobu/ K. Laber, H. Dyja // *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 2009. – №11. – P. 799–803.
8. Laber K. Analysis of the Industrial Conditions of the Multi-Stage Cooling Process of the 5.5 mm in Diameter Wire Rod of C70D High-Carbon Steel / K. Laber, H. Dyja, B. Koczurkiewicz // *Materials Testing*, 2015. – №57.
9. PN-EN ISO 16120-2:2012: Walcówka ze stali niestopowej przeznaczona do produkcji drutu – Część 2: Wymagania dla walcówki ogólnego przeznaczenia, Polski Komitet Normalizacyjny, 2012.

Лабер К. – д-р техн. наук каф. ОМДиИБ ЧТУ;
Кочуркевич Б. – д-р техн. наук каф. ОМДиИБ ЧТУ;
Гарстка Т. – проф. каф. ОМДиИБ ЧТУ.

ЧТУ – Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохов, Польша

E-mail: laber@wip.pcz.pl, koczur@wip.pcz.pl, tomasz.garstka@wip.pcz.pl