

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-2-32-37

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ПРУТКОВ ИЗ СТАЛИ 30MnB4 ПРИ ИСПЫТАНИИ НА КРУЧЕНИЕ И СЖАТИЕ

Лабер К.Б., Савицкий С.З., Дья Х., Кавалек А.М.

Ченстоховский Технологический Университет, Ченстохова, Польша

**Аннотация.** Физическое моделирование успешно применяется в материаловедении и обработке металлов давлением как при исследовании свойств исследуемых материалов, так и в прикладных исследованиях, целью которых является внедрение лабораторных исследований в промышленные условия. Точные знания характеристик исследуемых металлов и сплавов являются неотъемлемой частью процесса разработки новых технологий. Разработанные математические модели существенно увеличивают точность математического моделирования анализируемых технологических процессов.

В последнее время наблюдается интенсивное развитие лабораторной базы, позволяющей с большой степенью точности воспроизводить реальные промышленные процессы. Наиболее распространенным оборудованием, применяемым в процессах физического моделирования, является система моделирования металлургических процессов GLEEBLE и скручивающие пластометры. Это оборудование позволяет проводить исследования при большом диапазоне параметров деформации. В зависимости от вида анализируемого процесса возможно проведение исследований при разных схемах деформации (сжатие, растяжение, кручение, кручение с одновременным растяжением или кручение с одновременным сжатием).

После физического моделирования на продеформированном металле проводят металлографический анализ и исследования на механические свойства. На этом основании является возможным оптимизировать современные технологии и разрабатывать новые процессы производства.

В работе проведен анализ результатов физического моделирования процесса прокатки круглых прутков из низкоуглеродистой стали для холодной осадки марки 30MnB4. Исследования проводили по технологическим параметрам одного из цехов непрерывной прокатки прутков. Физическое моделирование проводили на скручивающем пластометре STD 812 и оборудовании для моделирования физических металлургических процессов GLEEBLE 3800.

После физического моделирования на образцах проводили металлографические исследования и испытания на механические свойства, а также исследования влияния предыдущих этапов обработки на свойства готового изделия.

**Ключевые слова:** низкоуглеродистая сталь, физическое моделирование, испытания на кручение, испытания на сжатие, металлографические исследования, механические свойства.

### Введение

Целью современных промышленных технологий обработки металлов давлением является не только получение готовых изделий соответствующих параметров и минимализация энергоемкости процессов, но и получение соответствующей микроструктуры и механических свойств [1]. Разработка таких технологий и их оптимизация требует соответствующей методики исследований, позво-

ляющей оценить геометрические, силовые параметры процессов деформации, а также их влияние на микроструктуру материала. Проведение таких исследований требует применение современных и высокоэффективных методов физического моделирования [1]. На данный момент широко развиваются такие методы физического моделирования, которые позволяют сопоставить полученные результаты лабораторных исследований с промышленными условиями. Результаты таких исследований представлены в работах [2–6]. Описанные выше лабораторные исследования чаще всего про-

водят на пластометрах, либо на оборудовании для моделирования металлургических исследований Gleeble [1]. Оборудование, предназначенное для физического моделирования процессов прокатки, должны отвечать требованиям, которые позволяют получить реальные условия анализируемого процесса. Кроме того, они должны обеспечить точный контроль таких параметров, как степень деформации, скорость деформации и температура [1].

В работе проведен сравнительный анализ результатов физического моделирования процесса прокатки прутков в условиях непрерывного стана на скручивающем пластометре STD 812 и системы GLEEBLE 3800.

### Цель работы, материал и методика проведения исследований

Целью работы было проведение сравнительного анализа результатов физического моделирования процесса прокатки прутков на скручивающем пластометре STD 812 и оборудовании для моделирования процессов GLEEBLE 3800. Представленные в работе исследования проводились с учетом технологии непрерывной прокатки прутков диаметром 22 мм из стали для холодной осадки марки 30MnB4.

На первом этапе было проведено физическое моделирование процесса прокатки прутков с применением параметров стана D370. Исследования были проведены на скручивающем пластометре STD 812 для всего технологического процесса. Для этого использовали образцы с рабочей частью диаметром  $d = 6$  мм и длиной  $l = 10$  мм. Для измерения и контроля температуры использовали термопары типа (PtRh10-Pt).

На втором этапе проводили физическое моделирование процесса прокатки в 3 последних проходах (с суммарной истинной степенью деформации 1,26) с использованием оборудования для моделирования металлургических процессов GLEEBLE 3800. Для этого использовали образцы диаметром  $d = 10$  мм и длиной  $l = 12$  мм. Для регистрации и контроля температуры применяли термопары типа К (NiCr-NiAl). Целью этого этапа было исследование влияния предыдущих этапов производственного процесса на формирование микроструктуры и свойств готовых прутков.

На рис. 1 дана схема термообработки образцов в процессе физического моделирования прокатки прутков в условиях непрерывного стана D370. Скорости нагрева приняты на основании параметров термообработки в реальных условиях.

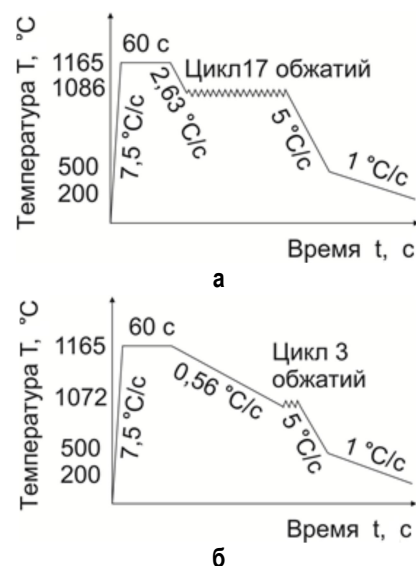


Рис. 1. Схемы термообработки при физическом моделировании процессов прокатки круглых прутков диаметром 20 мм в условиях непрерывного стана D370: а – скручивающий пластометр STD 812; б – система GLEEBLE 380

После физического моделирования на образцах проводили металлографические исследования и измерение свойств.

### Результаты исследований и их обсуждения

Химический состав стали 30MnB4 представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав стали для холодной осадки марки 30MnB4

| Содержание элементов, % |       |                   |       |       |       |       |        |       |       |
|-------------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| C                       | Mn    | Si                | P     | S     | Cr    | Ni    | Cu     | Al    | Mo    |
| 0,31                    | 1,06  | 0,23              | 0,013 | 0,007 | 0,22  | 0,07  | 0,16   | 0,025 | 0,012 |
| N                       | Pb    | Al <sub>мет</sub> | As    | Cb    | V     | Ti    | B      | Zn    | Sn    |
| 0,0119                  | 0,001 | 0,025             | 0,008 | 0,002 | 0,005 | 0,047 | 0,0030 | 0,018 | 0,013 |

Величины истинной степени деформации, скорости и сопротивления деформации при испытаниях на кручение и сжатие были рассчитаны по формулам, представленным в табл. 2.

Таблица 2  
Зависимости, использованные для расчета степени деформации, скорости и сопротивления деформации при испытаниях на кручение и сжатие

| Вид деформации | Деформация   | Скорость деформации   | Сопротивление деформации   |
|----------------|--|---|--|
| Кручение       | $\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot N}{\sqrt{3} \cdot L}$ | $\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot 60 \cdot L}$ | $\sigma_p = \frac{\sqrt{3} \cdot 3M}{2\pi r^3}$                  |
| Сжатие         | $\varepsilon = \frac{h_1}{h_0}$                                      | $\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}$  | $\sigma_p = \frac{4 \cdot F \cdot h}{h_0 \cdot \pi \cdot d_0^2}$ |

В таблице:  $r$  – радиус образца,  $L$  – длина образца,  $N$  – количество оборотов при кручении,  $\dot{N}$  – скорость кручения (скорость деформации),  $M$  – момент при кручении,  $h_0$  и  $h_1$  – начальная и конечная высота образца соответственно,  $F$  – величина силы, рассчитанная в процессе деформации,  $h$  – мгновенная высота образца при испытании,  $d_0$  – начальный диаметр образца.

Главные параметры процесса деформации при физическом моделировании процесса горячей прокатки прутков представлены в табл. 3. После деформации образцы охлаждали со скоростью  $5^\circ\text{C}/\text{с}$  до температуры  $500^\circ\text{C}$ , а далее –  $1^\circ\text{C}/\text{с}$  до температуры  $200^\circ\text{C}$ .

Таблица 3

Главные параметры процесса деформации при физическом моделировании процесса горячей прокатки прутков из стали 30MnB4

| Номер прохода | Температура деформации $T, ^\circ\text{C}$ | Истинная деформация $\epsilon$ | Скорость деформации $\dot{\epsilon}, 1/\text{с}$ | Время между обжатиями $t, \text{с}$ |
|---------------|--|--------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1             | 1086                                       | 0,12                           | 0,16   | 26,47                               |
| 2             | 1057                                       | 0,39                           | 0,35   | 19,89                               |
| 3             | 1037                                       | 0,28                           | 0,39   | 29,98                               |
| 4             | 1023                                       | 0,59                           | 0,96   | 11,33                               |
| 5             | 1010                                       | 0,46                           | 1,15   | 8,91                                |
| 6             | 999  | 0,50                           | 2,02   | 6,13                                |
| 7             | 998  | 0,45                           | 2,45   | 11,65                               |
| 8             | 1005                                       | 0,48                           | 4,71   | 3,35                                |
| 9             | 1009                                       | 0,44                           | 5,57   | 2,62                                |
| 10            | 1022                                       | 0,54                           | 10,39  | 1,85                                |
| 11            | 1030                                       | 0,48                           | 12,07  | 3,09                                |
| 12            | 1049                                       | 0,50                           | 20,53  | 2,28                                |
| 13            | 1052                                       | 0,51                           | 24,74  | 3,18                                |
| 14            | 1069                                       | 0,50                           | 46,34  | 1,35                                |
| 15            | 1072                                       | 0,41                           | 47,13  | 1,11                                |
| 16            | 1087                                       | 0,51                           | 79,93  | 0,90                                |
| 17            | 1091                                       | 0,34                           | 70,63  |                                     |

Изменение угла оборота образца в функции деформации при кручении на пластометре STD 812, соответствующее деформациям, отражающим прокатку прутков на стане D370, представлено на рис. 2.

На рис. 3 показаны реальные изменения сопротивления деформации и температуры стали 30MnB4 в процессе физического моделирования процесса горячей прокатки прутков на непре-

рывном стане D370 на скручивающем пластометре STD 812.

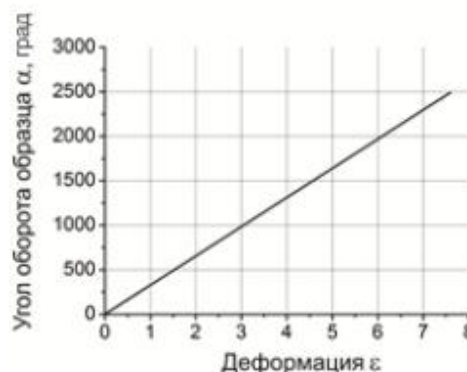


Рис. 2. Изменение угла поворота образца из стали 30MnB4 при физическом моделировании прокатки прутков на непрерывном стане D370 на скручивающем пластометре STD 812

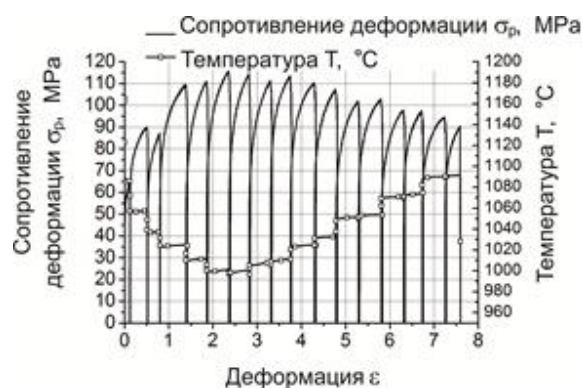


Рис. 3. Изменение сопротивления деформации и температуры стали 30MnB4 в процессе физического моделирования горячей прокатки прутков на непрерывном стане D370 на скручивающем пластометре STD 812

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что в процессе физического моделирования прокатки прутков из анализируемой марки стали сопротивление деформации до 6 прохода росло (до 113 МПа). Это может быть результатом снижения температуры деформируемого материала при продолжительных перерывах между проходами на начальном этапе процесса деформации (см. табл. 2). С 7 прохода значение сопротивления деформации стали 30MnB4 незначительно снижается до уровня 87 МПа (в последнем проходе). Причиной такого изменения сопротивления деформации может быть рост температуры, обусловленный ростом скорости деформации, а также меньшими перерывами между обжатиями (см. табл. 2).

На рис. 4 показаны заданные изменения длины образца при сжатии на оборудовании GLEEBLE, соответствующие деформациям в трех последних проходах непрерывного стана D370.

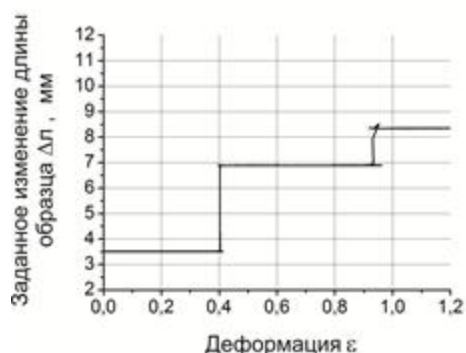


Рис. 4. Заданное изменение образца из стали 30MnB4 при физическом моделировании трех последних проходов непрерывного стана D370 на оборудовании GLEEBLE 3800

Реальные изменения сопротивления деформации и температуры стали 30MnB4 в процессе физического моделирования трех последних проходов непрерывного стана D370 на оборудовании GLEEBLE 3800 представлены на рис. 5.

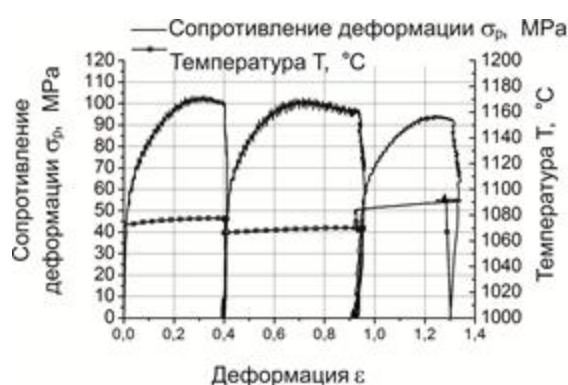


Рис. 5. Изменение сопротивления деформации и температуры стали 30MnB4 в процессе физического моделирования трех последних проходах непрерывного стана D370 на оборудовании GLEEBLE 3800

Анализируя изменения сопротивления деформации стали 30MnB4 в процессе физического моделирования трех последних проходов прокатки круглых прутков на оборудовании GLEEBLE 3800 (см. рис. 5), замечено постепенное снижение его значений. Такая же зависимость была и при моделировании на скручивающем пластометре.

Сравнивая изменения сопротивления деформации исследуемой марки стали для трех последних деформаций (скручивающий пластометр STD 812 и оборудование GLEEBLE 3800), можно заметить большое сходство полученных результатов. Разница в значениях сопротивления деформации

исследуемой марки стали, полученных при испытаниях на кручение и сжатие, составили соответственно: для 15 прохода – 6 %, для 16–4% и для 17–6 %. Такая разница может быть результатом применения разной схемы деформации (при кручении наблюдается состояние трехосного напряжения, а при сжатии – одноосного). Кроме того, при сжатии всегда есть трение, которое тоже влияет на уровень напряжений.

Следующим этапом исследований было проведение металлографических исследований и определение свойств образцов после физического моделирования на скручивающем пластометре STD 812 и на оборудовании GLEEBLE 3800. Микроструктура стали представлена на рис. 6.

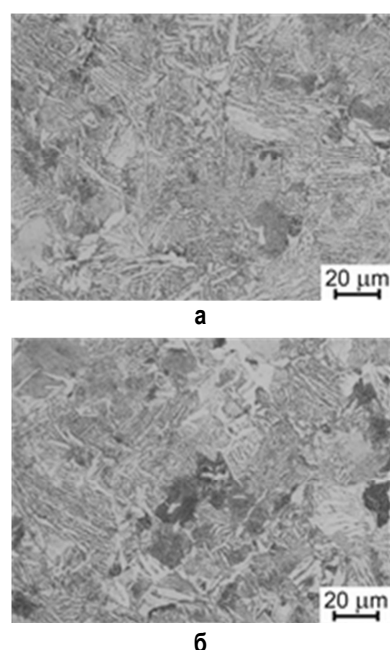


Рис. 6. Микроструктура стали 30MnB4 после физического моделирования процесса горячей прокатки прутков диаметром 20 мм в условиях непрерывного стана D370: а – после моделирования всего процесса деформации на скручивающем пластометре STD 812, б – после физического моделирования деформации в 3 последних проходах на оборудовании GLEEBLE 3800

На рис. 6, а видно, что после моделирования всего процесса горячей прокатки прутков на непрерывном стане структура состоит из игольчатого феррита. Средняя твердость составляет 231 HV. Предел текучести и прочности, рассчитанные на основании полученной твердости [7], составили:  $\sigma_{0,2}$  – около 488 МПа,  $\sigma_b$  – около 726 МПа.

После 3 последних проходов (рис. 6, б) микроструктура также состоит из игольчатого феррита. Средняя твердость стали также составила 231 HV.



Предел текучести и прочности, рассчитанные на основании измерений твердости [7], составил:  $\sigma_{0,2}$  – около 487 МПа,  $\sigma_b$  – около 725 МПа.

На основании представленных выше данных можно сделать вывод о том, что на формирование микроструктуры и свойств стали 30MnB4 влияет главным образом деформация в последних проходах. Игольчатое строение структурных составляющих исследуемой стали является результатом достаточно высокой скорости охлаждения для данного материала – 5°C/с.

Как показали результаты работ [8, 9], для стали 30MnB4 скорость охлаждения 5°C/с является критической. При этой скорости в стали формируется ферритно-бейнитная структура.

### Заключение

Результаты физического моделирования процесса горячего проката круглых прутков на скручивающем пластометре STD 812 и на оборудовании для моделирования металлургических процессов GLEEBLE 3800, а также их анализ позволили сделать следующие выводы:

- уровень и характер изменения сопротивления деформации исследуемой марки стали, полученные при испытаниях на кручение и сжатие, являются подобными;

- в анализируемом случае на формирование микроструктуры и механических свойств готового изделия влияет главным образом деформация в последних проходах и условия охлаждения после деформации;

- материал после испытаний на кручение, как и на сжатие, имел структуру игольчатого феррита с одинаковым уровнем твердости;

- величина механических свойств материала после испытаний на кручение соответствовала величине механических свойств, полученных в испытаниях на сжатие.

*Научная работа была профинансирована из средств Национального центра исследований и развития в 2013–2016 гг. в рамках проекта прикладных исследований № PBS2/A5/0/2013.*

### Список литературы

1. Sińczak J.: „Procesy przeróbki plastycznej”, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2003, ISBN 83-89541-11-4, s. 479-480.
2. Nowakowski A., Kuźmiński Z.: „Fizyczna symulacja procesu walcowania pierścieni z zastosowaniem plastometru skrętnego”. Hutnik – Wiadomości Hutnicze, 6 (2003), s. 246-251.
3. Laber K., Dya H., Milenin A.: „Modelowanie procesów wymiany ciepła podczas procesu regulowanego walcowania prętów”, materiały konferencyjne III Konferencji Naukowej pt.: „Walcownictwo 2005 – Procesy – Narzędzia - Materiały”, Ustroń, 19-21 października 2005 r., Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2005 r., ISBN 83-89541-52-1, s. 97-102.
4. Laber K., Milenin A., Markowski J.: „Metodyka fizycznego modelowania zjawisk zachodzących w materiale podczas procesu regulowanego walcowania prętów okrągłych”, materiały konferencyjne Konferencji Sprawozdawczej członków wszystkich Sekcji Komitetu Metalurgii PAN „METALURGIA 2006” pt.: „Polska metalurgia w latach 2002 – 2006”, red. K. Świątkowski, Kryńca-Czarny Potok 11-14 października 2006 r., Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2006 r., ISBN 83-910159-4-7, s. 519-526.
5. Laber K., Dya H., Koczurkiewicz B., Sawicki S.: „Fizyczne modelowanie procesu walcowania walcówki ze stali 20MnB4”, VI „Konferencja Naukowa WALCOWNICTWO 2014. Procesy - Narzędzia – Materiały”, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2014, ISBN 978-83-63663-51-3, 20.10 - 22.10.2014r., Ustroń, pp. 37-42.
6. Laber K., Koczurkiewicz B.: „Determination of optimum conditions for the process of controlled cooling of rolled products with diameter 16.5 mm made of 20MnB4 steel”, 24th International Conference on Metallurgy and Materials – METAL 2015, Conference Proceedings, June 3rd-5th 2015, Hotel Voroněž I, Brno Czech Republic, EU, Tanger Ltd., Ostrava, ISBN 978-80-87294-62-8 (with CD-ROM, containing full texts of papers, as a part of the proceedings, published in the Thomson Reuters database), pp. 364-370.
7. Sawada Y., Foley R. P., Thompson S. W., Krauss G.: „Proc. 35th MWSP” Conf. Proc. ISS-AIME, Pittsburgh, 1994, p. 263.
8. Dya H., Koczurkiewicz B., Laber K., Knapieński M.: „Physical simulation of microstructure evolution of the specimens made of 30MnB4 steel”, Sbornik Nauchnykh Trudov Obrabotka Materialov Davleniem No. 2 (41) 2015, Ministerstvo Obrazovanija i Nauki Ukrainy, Donbasskaja Gosudarstvennaja Mashinostroitel'naja Akademija, ISSN 2076-2151, Kramatorsk DGMA 2015, pp.65-70.
9. Dya H., Koczurkiewicz B., Laber K., Knapieński M.: „The use of dilatometer DIL 805A/D for prediction of microstructure of the steel wire rod for cold upsetting”, Sbornik Nauchnykh Trudov Obrabotka Materialov Davleniem No. 2 (41) 2015, Ministerstvo Obrazovanija i Nauki Ukrainy, Donbasskaja Gosudarstvennaja Mashinostroitel'naja Akademija, ISSN 2076-2151, Kramatorsk DGMA 2015, pp. 239-245.

Материал поступил в редакцию 25.04.16.

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-2-32-37

## PHYSICAL MODELLING OF 30MnB4 STEEL ROD PRODUCTION DURING TORSION AND COMPRESSION TESTING: COMPARATIVE ANALYSIS

**Laber Konrad Błażej** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: laber@wip.pcz.pl.

**Sawicki Sylwester Zdzisław** – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: sylsaw@wip.pcz.pl.

**Dyja Henryk** – D.Sc. (Eng.), M.Sc., Full Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: dyja@wip.pcz.pl.

**Kawalek Anna Malgorzata** – D.Sc. (Eng.), M.Sc., Associate Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland. E-mail: kawalek@wip.pcz.pl.

**Abstract.** Physical modelling finds a successful application in materials science and metal forming for both basic research, which looks at the rheological properties of materials, and for applied research which is aimed at introducing laboratory test results into the industrial environment. An accurate knowledge of the characteristics of the metals and alloys being examined is an integral part of the development of new technologies. New mathematical models offer a considerable increase in the accuracy of mathematical modeling of the processes under analysis.

There has recently been an intense enhancement of laboratory facilities which now allow researchers to simulate real-life production processes with a high degree of accuracy. The most popular devices designed for physical modelling include the GLEEBLE system simulating metallurgical processes, and torsion plastometers. These devices enable research to be conducted in a wide range of strain parameters. Depending on the process analyzed, it is possible to conduct research applying different strain patterns – compression, tension, torsion, torsion with tension or torsion with compression.

Upon physical modelling, a metallographic analysis and mechanical properties testing are carried out for the deformed material. This creates a basis which makes it possible to optimize the technology currently used and develop new manufacturing processes.

This paper analyzes the results of the physical modelling of a rolling process of low carbon round steel bars used for cold upsetting of 30MnB4 steel. The study was conducted based on the process parameters of one of the continuous bar rolling mills. Physical modeling was done with the help of the STD 812 torsion plastometer and the GLEEBLE 3800 simulator.

Upon physical modelling, a metallographic analysis and mechanical properties testing were carried out for the test material. Studies were done to identify the effect of the early stage processes on the properties of the finished product.

**Keywords:** Low carbon steel, physical modelling, torsion test, compression test, metallographic test, mechanical properties.

#### References

1. Sińczak J.: "Plastic Working Processes", Scientific Publishing House "Akapit", Cracow 2003, ISBN 83-89541-11-4, pp. 479-480.
2. Nowakowski A., Kuźmiński Z.: "Physical simulation of ring rolling with the use of a torsion plastometer", Metallurgist – Metallurgical News, 6 (2003), pp. 246-251.
3. Laber K., Dyja H., Milenin A.: "Modelling of heat exchange processes during a controlled strip rolling process", Proceedings of the III Scientific Conference "Rolling Industry 2005 – Processes – Tools – Materials" Ustroń, 19-21 of October 2005, Scientific Publishing House "Akapit", Kraków 2005 r., ISBN 83-89541-52-1, pp. 97-102.
4. Laber K., Milenin A., Markowski J.: "Physical modelling techniques for the processes occurring in the material during a controlled round bar rolling process", Conference Proceedings of the Reporting Conference of Members of the All Section of the Metallurgy Committee of Polish Academy of Sciences "Metalurgy 2006" under title: "Polish Metallurgy in 2002-2006", edited by K. Świątkowski, Krynica-Czarny Potok 11-14 of October 2006, Scientific Publishing House "Akapit", Cracow 2006, ISBN 83-910159-4-7, pp. 519-526.
5. Laber K., Dyja H., Koczurkiewicz B., Sawicki S.: "Physical modelling of a 20MnB4 steel wire rod rolling process", Scientific Conference "ROLLING INDUSTRY 2014 – Processes – Tools – Materials", Scientific Publishing House "Akapit", Cracow 2014, ISBN 978-83-63663-51-3, 20.10 - 22.10.2014r., Ustroń, pp. 37-42.
6. Laber K., Koczurkiewicz B.: "Identifying optimum conditions for the process of controlled cooling of rolled products with the diameter of 16.5 mm made of 20MnB4 steel", 24th International Conference on Metallurgy and Materials – METAL 2015, Conference Proceedings, June 3rd-5th 2015, Hotel Voroněž I, Brno Czech Republic, EU, Tanger Ltd., Ostrava, ISBN 978-80-87294-62-8 (with CD-ROM, containing full texts of papers, as a part of the proceedings, published in the Thomson Reuters database), pp. 364-370.
7. Sawada Y., Foley R. P., Thompson S. W., Krauss G.: "Proc. 35th MWSP" Conf. Proc. ISS-AIME, Pittsburgh, 1994, p. 263.
8. Dyja H., Koczurkiewicz B., Laber K., Knapieński M.: "Physical simulation of the microstructure evolution of the specimens made from 30MnB4 steel", Metal Forming, Collection of Science Papers, No. 2 (41) 2015, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Donbas State Engineering Academy, ISSN 2076-2151, Kramatorsk 2015, pp. 65-70.
9. Dyja H., Koczurkiewicz B., Laber K., Knapieński M.: "The use of dilatometer DIL 805A/D for the prediction of the microstructure of a steel wire rod for cold upsetting", Metal Forming, Collection of Science Papers, No. 2 (41) 2015, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Donbas State Engineering Academy, ISSN 2076-2151, Kramatorsk 2015, pp. 239-245.

Сравнительный анализ результатов физического моделирования процесса прокатки прутков из стали 30MnB4 при испытании на кручение и сжатие / Лабер К.Б., Савицкий С.З., Дья Х., Кавалек А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 32–37. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-32-37

Laber K.B., Sawicki S.Z., Dyja H., Kawalek A.M. Physical modelling of 30MnB4 steel rod production during torsion and compression testing: comparative analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 2, pp. 32–37. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-2-32-37