

МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В СТАЛИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

MULTISCALE MODELING OF STRUCTURAL AND PHASE
TRANSFORMATIONS IN STEEL DURING DRAWING

Константинов Д.В.¹, Бзовски К.², Корчунов А.Г.¹,
Кужиак Р.³, Пьетчшек М.², Ширяев О.П.⁴

D. Konstantinov¹, K. Bzowski², A. Korchunov¹,
R. Kuziak³, M. Pietrzyk², O. Shiryaev⁴

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

² Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица, Краков, Польша

³ Институт металлургии и железа, Гливице, Польша

⁴ ОАО «ММК-Метиз», Магнитогорск, Россия

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland

³ Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, Poland

⁴ ММК-METIZ, Magnitogorsk, Russia

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны особенности и потенциальные преимущества процесса волочения калиброванной TRIP стали, применение которой позволяет достигнуть широкого дополнительного комплекса эксплуатационных характеристик конечного изделия (прочность, износостойкость, адаптация к воздействиям окружающей среды). На примере критической необходимости учета микроструктурного строения TRIP сталей сформулированы актуальные проблемы традиционных методов проектирования технологических режимов волочения с использованием компьютерного конечно-элементного моделирования. **Цель работы:** совершенствование метода компьютерного моделирования процесса волочения калиброванной стали для повышения прогнозирования и исследования феноменологических особенностей структурообразования современных марок стали. **Используемые методы:** применялся усовершенствованный метод мультимасштабного компьютерного моделирования, позволяющий учесть микроструктурное строение обрабатываемой стали и динамические структурно-фазовые превращения (трип-эффект). Моделирование трип-эффекта осуществлялось посредством программной надстройки к используемому комплексу Abaqus. В качестве оцениваемых критериев напряженно-деформированного состояния были выбраны эквивалентные напряжения и деформации, а также осевые радиальные деформации на поверхности и в центральных слоях деформационной зоны. **Новизна:** к элементам новизны относится усовершенствованная методика моделирования осесимметричных процессов холодной пластической деформации, учитывающая микроструктуру обрабатываемого металла и ее изменения в условиях деформации, что сделало возможным расчет значений параметров напряженно-деформированного состояния на микроуровне стали и исследование трансформаций в сталях с метастабильной структурой. **Результат:** в статье приведено сравнение результатов моделирования с учетом влияния трип-эффекта и без него. Сравнение показало, что мартенсит, который появляется в микроструктуре стали, многократно повышает уровень эквивалентных напряжений во всем репрезентативном объеме, что принципиально важно при проектировании режимов волочения. Метод также позволил изучить деформационное взаимодействие элементов микроструктуры TRIP стали между собой, тем самым объяснив наличие более высоких (в 2–3 раза превышающих средние значения) радиальных деформаций в пластичных фазах вблизи большого скопления зерен более прочных фаз бейнита и мартенсита. Предложенный метод позволил повысить прогнозирующую способность предпроектного моделирования и изучить феноменологические особенности структурообразования современных марок сталей в ходе процесса волочения. **Практическая значимость:** получены исходные данные для проектирования маршрутов волочения стали с трип-эффектом, что позволит расширить номенклатуру материалов традиционного процесса волочения калиброванной стали путем использования современных, технологически гибких материалов.

Abstract

Problem Statement (Relevance): The article describes some prospective benefits of using TRIP steels in the cold drawing process, which results in the final product having a wide range of additional properties such as strength, wear resistance and resistance to environmental effects. Stating the critical need to account for the microstructure of TRIP steels the authors have formulated some important problems of the conventional approach to engineering drawing processes that exploits the finite element method. **Objectives:** The study aims to optimise the computer modelling techniques applied in simulation of steel drawing operations in order to increase the model's predictive power and to study the structure forming phenomena characteristic of advanced steels. **Methods Applied:** An optimised multiscale modelling method was applied which helps observe the microstructure of a workpiece in process, as well as dynamic structural and phase transformations, i.e. the TRIP effect. An add-in programme was used with Abaqus to simulate the TRIP effect. Equivalent stresses and strains, as well as axial and radial deformations at the surface and in the center of the deformation zone were estimated to analyse the stress-strain state of a workpiece. **Originality:** This research resulted in improved modelling technique applied in simulation of the axisymmetric cold working process that accounts for the microstructure of a workpiece in process and its transformations under strain. Due to this one can calculate the microstructural parameters of steel in a stress-strain state and look at the transformations that take place in metastable steels. **Findings:** The article compares the results of modelling allowing for the TRIP effect and overlooking it. The comparison shows that martensite, which forms in the microstructure, causes a significant rise of equivalent stresses across the entire representative volume, which is extremely critical in the drawing process engineering. The method applied also gave a better understanding of how the microstructural elements interact in TRIP steel under strain, which helped explain more intense (2 or 3 times as high compared with the average values) radial strains in the plastic phases close to bigger grain clusters of stronger bainite and martensite phases. The proposed technique helped increase the predictive power of initial simulation and study the structure forming phenomena characteristic of advanced steels in a drawing process. **Practical Relevance:** The study helped obtain initial data that can be used to design the drawing processes for TRIP steels. This will enable to use advanced and technically flexible materials in the conventional drawing process thus expanding the range of applicable steels.

Ключевые слова: волочение, сталь, трип-эффект, мультимасштабное моделирование, репрезентативный объем, напряженно-деформированное состояние, микроструктура.

Keywords: Drawing, steel, TRIP effect, multiscale simulation, representative volume, stress-strain state, microstructure.

Введение

Современная машиностроительная индустрия с каждым годом предъявляет все более высокие требования к механическим и эксплуатационным свойствам деталей машин и агрегатов. Элементы механизмов и машин должны обладать не только достаточным ресурсом надежности, но и быть в состоянии адаптироваться под возможные неблагоприятные условия эксплуатации [1].

Основными технологическими процессами производства заготовок деталей и элементов агрегатов являются методы обработки металлов давлением (ОМД). Получение новых свойств и технологических характеристик заготовок становится возможным за счет либо расширения номенклатуры используемых при ОМД материалов, либо разработки новых режимов или способов ОМД [2-3]. В обоих случаях возникает необходимость в современных инженерных методах проектирования, обеспечивающих предельно высокую достоверность прогноза результатов исследуемого технологического процесса.

... ..

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Моделирование на макроуровне. Для оценки технологического потенциала процесса было выбрано однократное волочение калиброванной стали с исходного диаметра 38 мм. Данный диаметр наиболее востребован во всех областях машиностроения.

Для изучения влияния обжатия на свойства металла финальный диаметр варьировался от 37 до 35 мм. Угол раскрытия волоки – в пределах от 18 до 12 град. Скорость волочения составляла 100 мм/с.

В качестве исходного материала была выбрана сталь TRIP 700, химический состав которой представлен в табл. 1.

Химический состав стали марки TRIP 700, % (масс)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	P	S
0,177	1,54	0,32	0,02	–	0,03	0,02	1,35	0,075	0,007

Механические свойства стали TRIP 700 представлены на рис. 1.

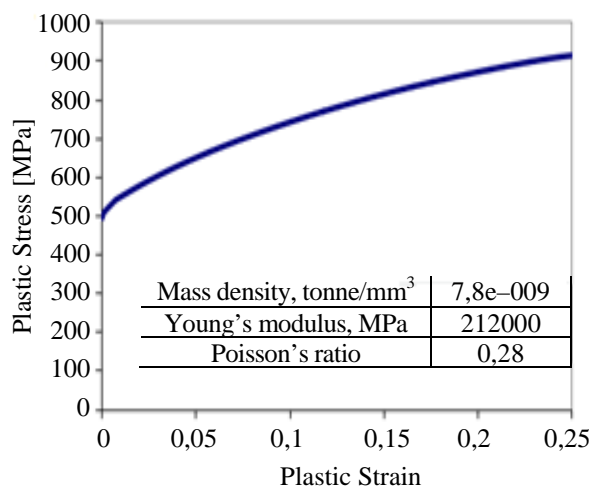


Рис. 1. Механические свойства стали TRIP 700

Моделирование на микроуровне. Для субмоделирования была использована фотография микроструктуры стали TRIP 700 (рис. 2). Исходная микроструктура исследуемой стали имела следующий состав: остаточный аустенит (~22%), феррит (~66%) и бейнит (~12%).

... ..

Для симуляции трип-эффекта была выбрана следующая экспериментально установленная математическая зависимость [14–15]:

$$v_{\gamma} = v_{\gamma\text{-initial}} - 26,708\varepsilon - 0,003\dot{\varepsilon} + 53,516\varepsilon^2 - 0,018\varepsilon\dot{\varepsilon} - 1,06 \cdot 10^{-5} \dot{\varepsilon}^2, \quad (1)$$

где $v_{\gamma\text{-initial}}$ – исходное количество остаточного аустенита в микроструктуре TRIP стали; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; ε – степень деформации.

... ..

Заключение

Результаты расчета НДС в мультимасштабных моделях продемонстрировали не только перспективность данного инженерного инструмента, но и неотъемлемую необходимость учета микроструктуры и ее поведения под нагрузкой при проектировании даже традиционных процессов с использованием современных материалов.

Предложенный метод создания мультимасштабных моделей в случае исследования процесса волочения калиброванной TRIP стали позволил:

1. Доказать важность учета TRIP эффекта с позиции НДС, так как формирующиеся в ходе его реализации зародыши высокопрочного мартенсита являются локализаторами высоких значений напряжений Мизеса.
2. Обнаружить высокие сжимающие деформации в диапазонах значений от $-0,03$ до $-0,15$ (в центре) и от $-0,07$ до $-0,22$ (на поверхности) в фазах феррита и остаточного аустенита.
3. Изучить деформационное взаимодействие элементов микроструктуры между собой, тем самым объяснив наличие более высоких радиальных деформаций в пластичных фазах вблизи большого скопления зерен более прочных фаз бейнита и мартенсита.

В совокупности это позволило не просто повысить прогнозирующую способность моделей процесса и скорость их расчета, но и расширить номенклатуру материалов традиционного процесса волочения калиброванной стали путем использования современных технологически гибких TRIP сталей.

Список литературы

1. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Рубин Г.Ш., Минаев А.А., Назайбеков А.Е., Дья Х. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 92–97.
2. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Носов А.Д., Носков Е.П., Коломиец Б.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 64–68.
3. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Металлург. 2014. № 4. С. 92–95.
4. Sarma, G.B., Radhakrishnan, B., Zacharia, T., 1998, Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale, Computational Materials Science, 12, 1998, 105-123.
5. Son, S.-B., Roh, H., Kang, S.-H., 2010, Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire, Journal of Materials Science, 45, 236-244.
6. Watanabe, I., Setoyama, D., Nagasako, N., Iwata, N., Nakanishi, K., 2012, Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite–pearlite steel with numerical material testing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 89, 829–845.
7. Fischer, F.D., Reisner, G., Werner, E., Tanaka, K., Cailletaud, G., Antretter, T., 2000. A new view on transformation induced plasticity (TRIP). International Journal of Plasticity 16 (7–8), 723–748.
8. Bleck, W., Schael, I., 2000. Determination of crash-relevant material parameters by dynamic tensile tests. Steel Research 71, 173–178.
9. Choi, I.D., Bruce, D.M., Kim, S.J., et al., 2002. Deformation behavior of low carbon TRIP sheet steels at high strain rates. ISIJ International 42, 1483–1489.
10. Kim YG, Kim TW, Han JK, Chang RW. Development of new austenitic Fe-Mn-Al-C steels for automotive applications. Key Eng Mater 1993;84:461–72.
11. Grässel O, Krüger L, Frommeyer G, Meyer LW. High strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP steels development – properties – application. Int J Plast 2000;16:1391–409.
12. Frommeyer G, Brück U, Neumann P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes. ISIJ Int 2003;43:438–46.
13. Balzani, D., Schroder, J., 2008, Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations, Proc. Appl. Math. Mech., 8, 10533-10534.
14. Wiewiorowska, S., Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates, Steel Research International. 81 (2010) 262-265.
15. Wiewiorowska, S., The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect. Solid State Phenomena, 165 (2010) 216-222.

References

1. Gun G.S., Mezin I.Yu., Rubin G.Sh., Minaev A.A., Nazaybekov A.E., Dyja H. Research genesis in the field of steel products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 92–97. (In Russ.)
2. 2. Chukin M.V., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Yu.Yu., Nosov A.D., Noskov E.P., Kolomiets B.A. Innovative potential of new technology behind nanostructured steel based metalware production. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 2, pp. 64–68. (In Russ.)
3. Gun G.S., Chukin M.V., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. Current issues of metalware production qualimetry during the rise of the sixth technological wave. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 4, pp. 92–95. (In Russ.)
4. Sarma, G.B., Radhakrishnan, B., Zacharia, T., 1998, Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale, Computational Materials Science, 12, 1998, 105-123.
5. Son, S.-B., Roh, H., Kang, S.-H., 2010, Relationship between microstructure homogeneity and bonding stability of ultrafine gold wire, Journal of Materials Science, 45, 236-244.
6. Watanabe, I., Setoyama, D., Nagasako, N., Iwata, N., Nakanishi, K., 2012, Multiscale prediction of mechanical behavior of ferrite–pearlite steel with numerical material testing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 89, 829–845.

7. Fischer, F.D., Reisner, G., Werner, E., Tanaka, K., Cailletaud, G., Antretter, T., 2000. A new view on transformation induced plasticity (TRIP). *International Journal of Plasticity* 16 (7–8), 723–748.
8. Bleck, W., Schael, I., 2000. Determination of crash-relevant material parameters by dynamic tensile tests. *Steel Research* 71, 173–178.
9. Choi, I.D., Bruce, D.M., Kim, S.J., et al., 2002. Deformation behavior of low carbon TRIP sheet steels at high strain rates. *ISIJ International* 42, 1483–1489.
10. Kim Y.G., Kim T.W., Han J.K., Chang R.W. Development of new austenitic Fe-Mn-Al-C steels for automotive applications. *Key Eng Mater* 1993;84:461–72.
11. Grässel O, Krüger L, Frommeyer G, Meyer LW. High strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP steels development – properties – application. *Int J Plast* 2000;16:1391–409.
12. Frommeyer G, Brüh U, Neumann P. Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes. *ISIJ Int* 2003;43:438–46.
13. Balzani, D., Schroder, J., 2008. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations, *Proc. Appl. Math. Mech.*, 8, 10533-10534.
14. Wiewiorowska, S. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates, *Steel Research International*. 81 (2010) 262-265.
15. Wiewiorowska, S. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP effect. *Solid State Phenomena*, 165 (2010) 216-222.

Сведения об авторах

Константинов Дмитрий Вячеславович – магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: const_dimon@mail.ru.

Бзовски Кшиштоф – аспирант, Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица, Краков, Польша.

Корчунов Алексей Георгиевич – д-р техн. наук, проф., проректор по международной деятельности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: international@magtu.ru.

Кужиак Роман – д-р техн. наук, проф., Институт металлургии железа, Гливице, Польша.

Пьетшик Мацей – д-р техн. наук, проф., Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица, Краков, Польша.

Ширяев Олег Петрович – директор, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия.

Dmitry V. Konstantinov – Master’s student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: const_dimon@mail.ru.

Krzysztof Bzowski – Postgraduate student

AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland.

Alexey G. Korchunov – D.Sc. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Affairs

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: international@magtu.ru.

Roman Kuziak – Doctor of Science, Professor

Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice, Poland.

Maciej Pietrzyk – Doctor of Science, Professor

AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland.

Oleg P. Shiryaev – Director

ММК-МЕТИЗ, Magnitogorsk, Russia.