

УДК 621.778

Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Столяров А.Ю., Язвенко А.М., Савельева И.А.

МУЛЬТИМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЧЕТОМ МИКРОМЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЛИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного мультимасштабного конечно-элементного моделирования процесса волочения высокопрочной проволоки с перлитной микроструктурой для сердечников сталеалюминиевых проводов. Описана методика и представлены результаты моделирования процесса волочения с использованием комплекса SIMULIA Abaqus с учетом различного характера ориентации цементитных пластин в микроструктуре проволоки относительно оси волочения и межпластиночного расстояния. На основе результатов моделирования и прогноза структурообразования проволоки исследованы маршруты волочения с различным распределением единичных обжатий.

Ключевые слова: высокопрочная проволока, волочение, мультимасштабное моделирование, микроструктура, цементитные пластины, ориентация

Введение

В настоящее время основной мировой тренд в металлургической отрасли заключается в повышении прочности выпускаемой проволоки ответственного назначения. За последние годы верхний предел диапазона прочности сталей, применяемых при производстве проволоки, значительно увеличился. Высокопрочная и сверхвысокопрочная проволока широко используется при производстве канатов, арматуры, металлокорда, швартовых тросов и якорных канатов для морской нефтяной промышленности, тросов подвесных мостов, вантовых конструкций. Появились виды готовой продукции с принципиально новыми требованиями к прочности. Одним из таких видов является высокопрочная и сверхвысокопрочная проволока (временное сопротивление разрыву не менее 2100 МПа) с покрытиями на основе цинка, используемая для производства сердечников неизолированных сталеалюминиевых проводов. Развитие отечественной технологии производства такой проволоки позволит увеличить электропроводность существующих высоковольтных линий, повысить стойкость провода к коррозии, воздействию ветра, обледенению и механическим нагрузкам, увеличить расстояние между опорами при строительстве новых линий, уменьшить общие капиталовложения в строительство и реконструкцию линий.

Для производства высокопрочной проволоки для сердечников сталеалюминиевых проводов используют стали с содержанием углерода до 1,0% С. Технология обработки исходной катанки перед процессом волочения предусматривает формирование в стали перлитной микроструктуры [1–3].

В процессе волочения проволоки к свойствообразующим процессам относятся утонение цементитных пластин, изменение межпластиночного расстояния в перлитных колониях и металлографической текстуры, локализация микродеформации [4–6]. Данные параметры микроструктуры динамично изменяются в ходе процесса волочения и определяют техно-

логичность обработки и уровень механических свойств готовой проволоки.

Ряд работ, посвященных мультимасштабному компьютерному моделированию процесса волочения перлитных сталей, наглядно продемонстрировал целесообразность и актуальность исследований микронапряжений и микродеформаций на уровне перлитных колоний [7–11]. Считается, что напряженно-деформированное состояние (НДС) даже на масштабном уровне отдельных перлитных колоний характеризуется высокой степенью неравномерности. Поэтому актуален вопрос учета указанных особенностей эволюции микроструктуры стали для проектирования маршрутов волочения проволоки повышенной прочности для сердечников сталеалюминиевых проводов.

Методика моделирования

При построении макромоделей процесса волочения стали марки 90 использовался подход, описанный в работе [12].

Исходя из анализа качества исходной катанки из микроструктуры, были выделены следующие характерные участки:

- 1) перлитные колонии с цементитными пластинами, параллельными оси волочения;
- 2) перлитные колонии с цементитными пластинами, перпендикулярными оси волочения;
- 3) перлитные колонии с цементитными пластинами, располагающимися под произвольным углом к оси волочения.

Для дальнейшего моделирования были созданы соответствующие репрезентативные объемы указанных перлитных колоний (рис. 1).

Для распределения свойств микроструктурных составляющих были сформированы следующие наборы конечных элементов сетки (раздел Sets модуля Parts): группа элементов цементита (рис. 2, а), группа элементов феррита (рис. 2, б).

Реологические свойства микроструктурных составляющих стали были заданы согласно данным, приведенным в работе [13].

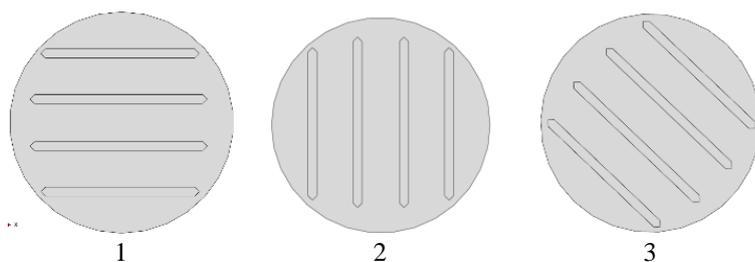


Рис. 1. Общий вид репрезентативных объемов:
1 – цементитные пластины параллельны оси;
2 – цементитные пластины перпендикулярны оси;
3 – цементитные пластины под углом к оси

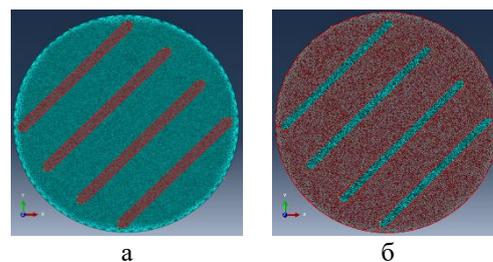


Рис. 2. Группы элементов сетки, соответствующие:
а – цементиту; б – ферриту

Для расчета макромоделей использовались следующие маршруты волочения:

– Маршрут А: маршрут волочения с линейно убывающими единичными обжатиями:

7.00 – 6.08 – 5.30 – 4.65 – 4.10 – 3.62 – 3.22 – 2.88 – 2.58 – 2.32 – 2.1

– Маршрут Б: маршрут волочения с комбинированными единичными обжатиями (малые, средние, уменьшающиеся):

7.00 – 6.31 – 5.62 – 4.97 – 4.37 – 3.83 – 3.36 – 2.96 – 2.62 – 2.33 – 2.1.

В качестве наиболее наглядного сравнительного параметра для репрезентативных объемов перлитных колоний была выбрана эквивалентная деформация (PEEQ). На макроуровне анализировались распределения эквивалентных деформаций после каждого прохода.

Сравнение распределений деформаций после каждого прохода в маршруте волочения А (рис. 3) и Б (рис. 4) показало, что при волочении с линейно убывающими единичными обжатиями формируется более равномерный градиент деформаций от поверхности до центра проволоки. Однако при этом в абсолютных значениях максимальных и минимальных деформаций по продольному сечению проволоки разница между маршрутами составляет менее 8%. В связи с более интенсивной на первых стадиях процесса реализацией заложенного в исходной заготовке ресурса пластичности при обработке по маршруту А радиальные и продольные осевые напряжения в деформационной зоне имеют минимальную область околонулевых значений. Такое воздействие напряжений при волочении оказывает серьезное влияние на распределение продольных остаточных напряжений в обоих маршрутах.

Следует отметить, что при волочении по маршруту Б в первых пяти проходах остаточные напряжения и их распределение в сечении практически не от-

личаются от маршрута А, но на последней половине маршрута отличаются на более чем 20% по номинальным значениям и по итоговому распределению в сечении готовой проволоки. Данный параметр может быть потенциально важен для корректной оценки вклада многостадийной холодной деформации волочением в механические свойства готового изделия, так как величина этих напряжений сильно различается по сечению проволоки и, как показывают результаты компьютерного моделирования, может достигать до 800 МПа в виде растягивающих напряжений, сконцентрированных на поверхности проволоки.

Анализ моделей цементитных пластин в каждом проходе волочения (рис. 5-10) наглядно демонстрирует ключевые особенности микроструктурного поведения перлитной проволоки в процессе волочения, а именно не только уменьшение межпластиночного расстояния с нарастанием суммарной степени деформации по маршруту волочения, но и реориентацию цементитных пластин с формированием ярко выраженной направленной текстуры деформации. При этом в зависимости от начального характера ориентации пластин относительно оси волочения различно ориентированные пластины имеют соответствующие различные тенденции протекания деформации в них. Так, в частности, цементитные пластины, изначально ориентированные параллельно оси волочения, на поверхности и в центре проволоки наиболее активно испытывают утонение и вытягивание в направлении деформации. При этом следует принимать во внимание, что сама пластина в таком случае деформируется неравномерно, что заметно даже на идеализированной «синтетической» модели перлитной колонии. На определенном этапе, ориентировочно в области суммарной деформации волочением 0,6-0,65, на данных пластинах начинает формироваться «шейка» и последующее разрушение.

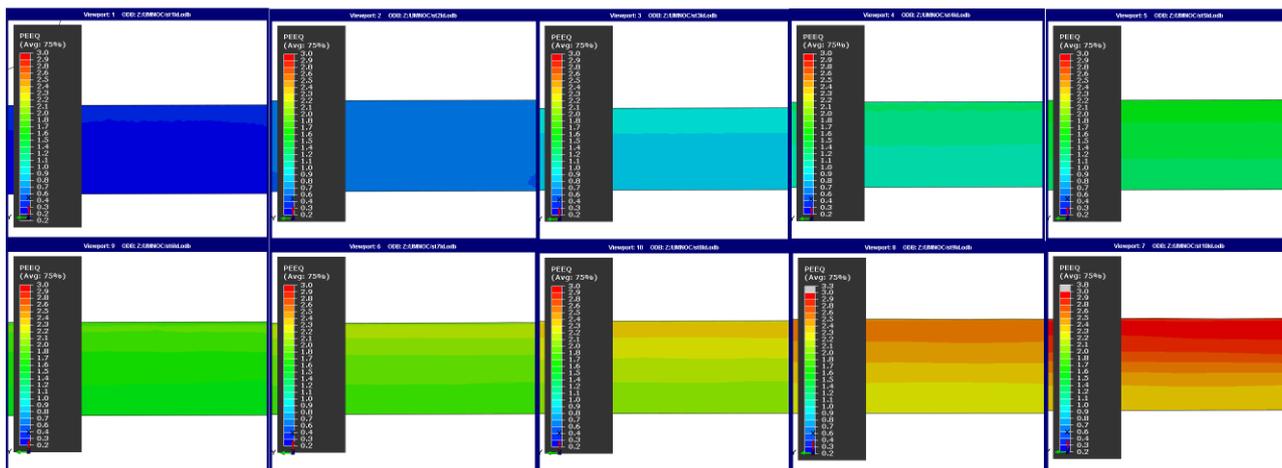


Рис. 3. Распределение деформаций после каждого прохода в маршруте волочения А

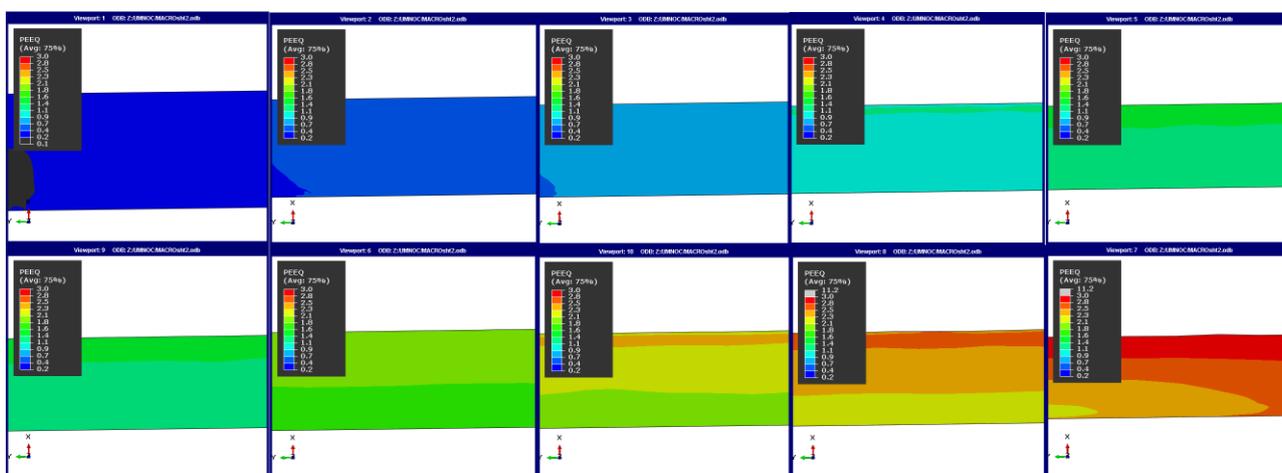


Рис. 4. Распределение деформаций после каждого прохода в маршруте волочения Б

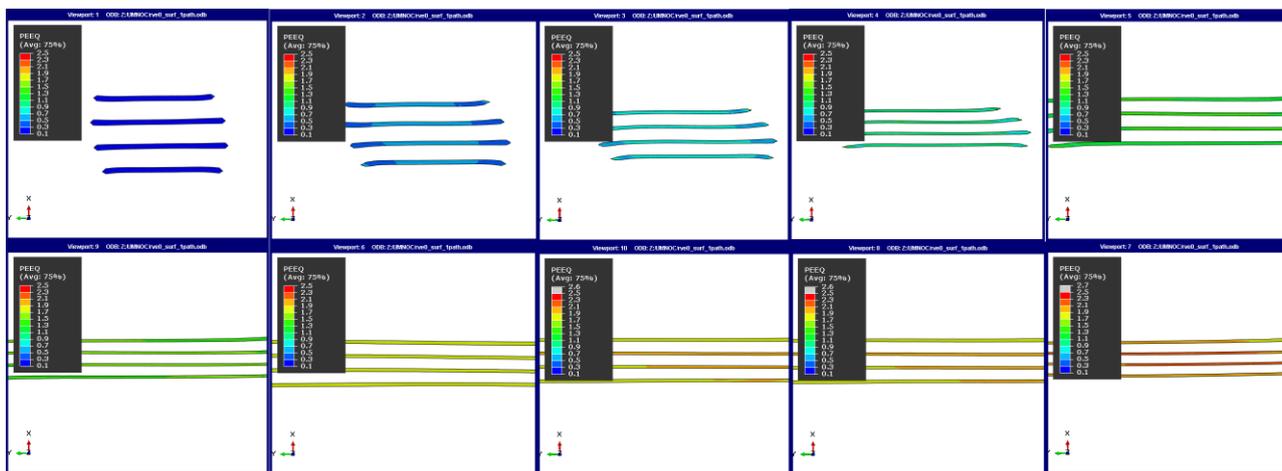


Рис. 5. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности параллельна оси волочения), маршрут А

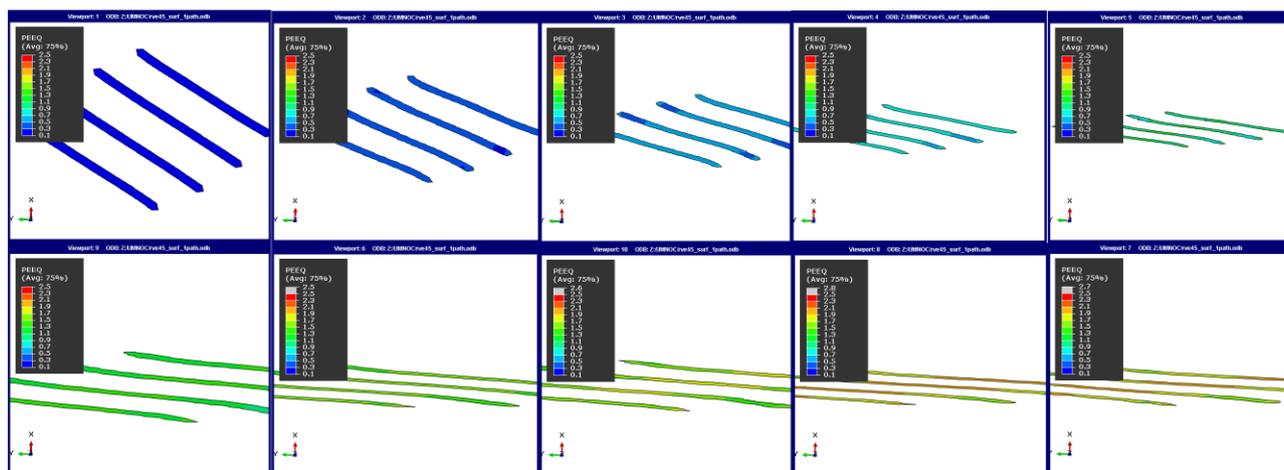


Рис. 6. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 45° оси волочения), маршрут А

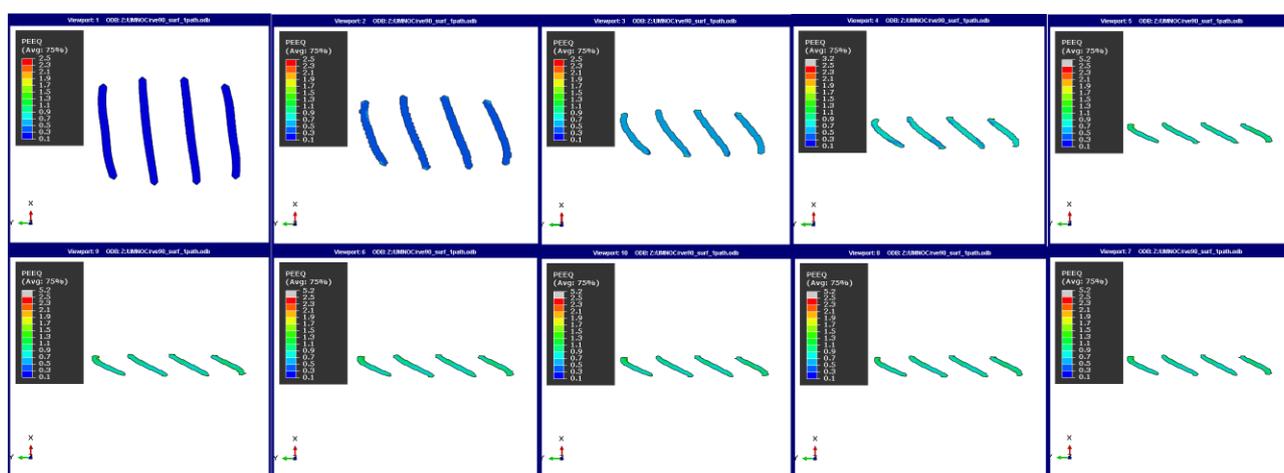


Рис. 7. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 90° оси волочения), маршрут А

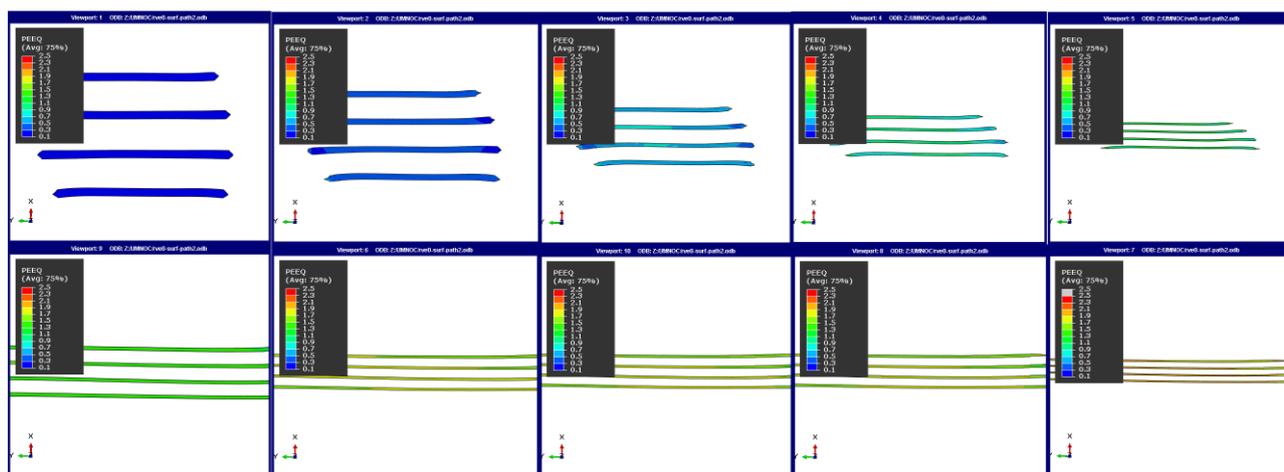


Рис. 8. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности параллельно оси волочения), маршрут Б

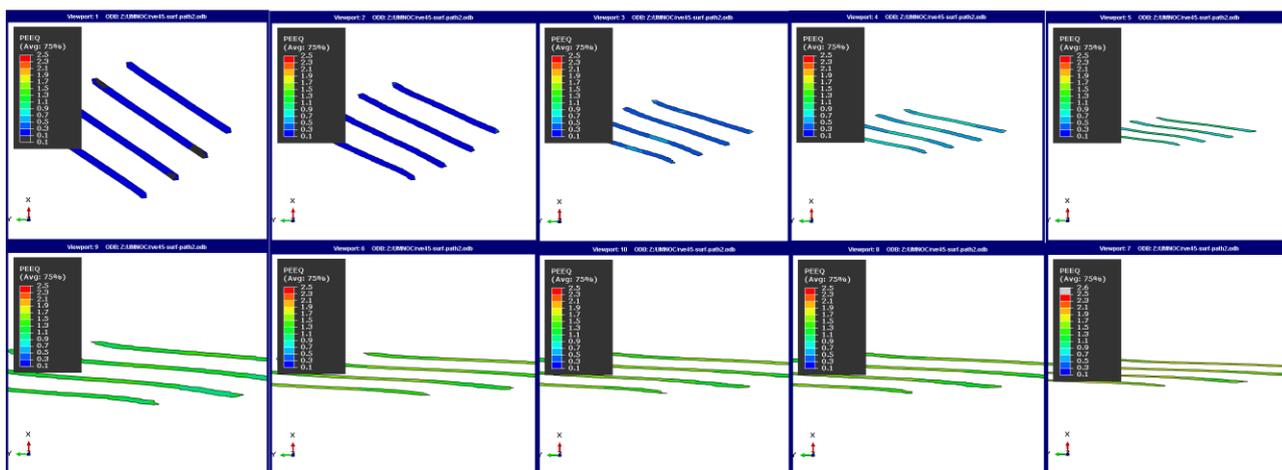


Рис. 9. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 45° к оси волочения), маршрут Б

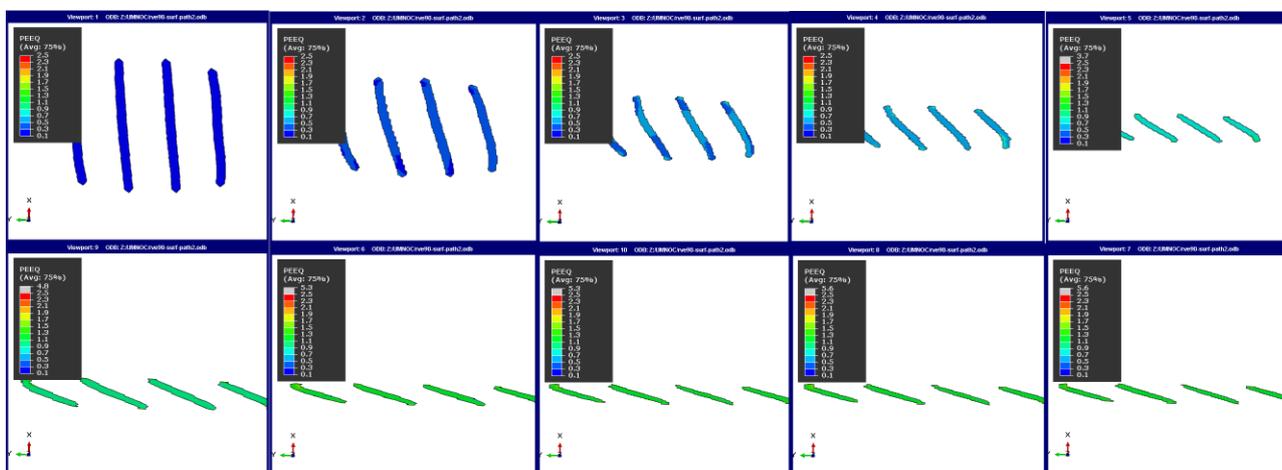


Рис. 10. Распределение деформаций в цементитных пластинах (перлитная колония на поверхности под 90° к оси волочения), маршрут Б

Поведение цементитных пластин, ориентированных перпендикулярно оси волочения, значительно отличается от характера поведения пластин, ориентированных параллельно оси волочения. Межпластиночное расстояние в них практически не изменялось, сами пластины в силу особенностей приложения «макронагрузки» значительно фрагментировались и имели склонность к разрушению. При этом стоит отметить, что тенденция к реориентации цементитных пластин в поверхностных слоях проволоки всё же сохранялась (см. рис. 10), что может служить потенциальным фактором зарождения микротрещин в данной области проволоки.

Наиболее благоприятные тенденции деформационного поведения проявляет модель перлитной колонии, расположенная под условным углом в 45° к оси волочения. Такие колонии имеют наиболее благоприятное напряженно-деформированное состояние на протяжении всего маршрута волочения. Напряженно-деформированное состояние до определенной стадии

волочения является равномерным, а при достижении деформации ~0,7 начинает характеризоваться так называемыми «линиями сброса», при которых начинается дробление и изгиб цементитных пластин.

Результаты моделирования показывают, что разница между степенями деформации до начала фрагментации и измельчения между двумя вышеописанными частными случаями расположения цементитных пластин и перлитными колониями с ориентированными под углом 45° относительно оси волочения пластинами составляет 1,8 раз.

Динамика уменьшения межпластиночного расстояния и изменения угла ориентации перлитных колоний относительно оси волочения между маршрутами А и Б отличается, несмотря на соизмеримо близкие значения на выходе из обоих маршрутов. При реализации маршрута А межпластиночное расстояние наиболее интенсивно изменяется в ходе первых четырех проходов, после чего пластины цементита начинают только накапливать деформации. При реали-

зации маршрута Б данный момент проявляется в пятом/шестом проходах. Особенно ярко это выражено на примере перлитных колоний в центре проволоки, что находит обоснование также в ранее описанных результатах моделирования на макроуровне.

Следует отметить, что потенциально перспективным вопросом развития исследований с применением подобного подхода к учету микромеханики деформирования в таком случае является изучение поведения различного рода микроструктурных «неоднородностей» (цементитной сетки, пор или неметаллических включений), так как степень их влияния и поведение в целом можно рассмотреть с позиции неоднородности напряженно-деформированного состояния на уровне каждой отдельной колонии, а не перлитной проволоки, как традиционно описываемого в моделях изотропного материала.

Теоретически возможным становится анализ маршрутов волочения с позиции снижения вероятности обрывности или трещинообразования в процессе волочения с поправкой на стохастический характер микроструктурного строения проволоки с позиции распределения размерных параметров.

Основываясь на феноменологических моделях репрезентативных объемов перлитных колоний в микроструктуре стали и подходом, описанным в работе [14], уровень временного сопротивления перлитной стали на любой стадии волочения может быть представлен в виде уравнения Эмбери-Фишера (Embury-Fisher equation), то есть как зависимости от угла разворота цементитных пластин, углеродного коэффициента и исходных значений межпластиночного расстояния и временного сопротивления разрыву. В свою очередь, это позволяет получить еще один вид теоретической оценки и прогноза механических свойств, но при этом учитывающий фундаментальную микромеханику деформирования стали, что особенно важно на последних стадиях маршрута волочения в области практически полного исчерпания ресурса пластичности. Исходя из этого, суммарная степень деформации в результате обработки по представленным маршрутам волочения может теоретически обеспечивать уровень временного сопротивления проволоки из стали марки 90 в диапазоне 2310–2460 МПа.

Заключение

Учет микромеханики деформирования при проектировании маршрутов волочения позволяет наиболее полно оценить картину напряженно-деформированного состояния и зависящие от него параметры структурообразования. При этом становится возможным не просто произвести качественное и количественное сравнения, но и провести своего рода цифровой эксперимент по проектированию новых и совершенствованию действующих маршрутов воло-

чения высокопрочной проволоки с прогнозом уровня механических свойств проволоки. Для проволоки повышенной прочности для сердечников сталалюминиевых проводов на основе анализа результатов моделирования может быть рекомендован маршрут волочения с комбинированными обжатиями.

Список источников

1. Hohenwarter A. Ultra-strong and damage tolerant metallic bulk materials: a lesson from nanostructured pearlitic steel wires // *Scientific Reports*. 2016. 6 (1). doi: 10.1038/srep33228.
2. Influence of the pearlite fineness on the mechanical properties, deformation behavior, and fracture characteristics of carbon steel / Izotov V.I., Pozdnyakov V.A., Luk'yanenko E.V. et al. // *Physic Metal and Metallography*. 2007. 103. P. 519 – 529.
3. Toribio J. Role of the microstructure on the mechanical properties of fully pearlitic eutectoid steels // *Fracture and Structural Integrity related Issues*. 2014. 30. P. 424-430.
4. Brandaleze E. Structural evolution of pearlite in steels with different carbon content under drastic deformation during cold drawing // *Procedia Materials Science*. 2015. 8. P. 1023 –1030.
5. Microstructural evolution, strengthening mechanisms and strength structure relationship in cold-drawn pearlitic steel wire / Zhang X., Hansen N., Godfrey A., Huang X. // *Risoe International Symposium on Materials Science. Proceedings*. 2012. 33. P. 407-416.
6. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing // *Acta Materialia*. 2002. 50. P. 4431-4447.
7. Muskalski Z., Milenin A. Development of finite element model of reorientation of cementite lamellae in pearlite colonies in wire drawing process for wires made from high carbon steel // *Solid State Phenomena*. 2010. 165. P. 136-141.
8. Gerstein G., Nürnberger F. Structural evolution of thin lamellar cementite during cold drawing of eutectoid steels // *Procedia Engineering*. 2014. 81. P. 694-699.
9. Muskalski Z., Milenin A., Kustra P. The multi-scale FEM simulation of wire fracture during drawing of perlitic steel // *Materials Science Forum*. 2008. 575 – 578. P. 1433-1438.
10. The Multi-Scale FEM Simulation of the Drawing Processes of High Carbon Steel / Milenin A., Muskalski Z., Wiewirowska S., Kustra P. // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007. 23. P. 71-74.
11. Мультимасштабное моделирование структурно-фазовых превращений в стали при волочении / Константинов Д.В., Бзовски К., Корчунов А.Г., Кузиак Р., Пьетшик М., Ширяев О.П. // *Вестник Магнитогорского государственного технического*

- университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 90–98.
12. Компьютерное моделирование процесса волочения проволоки из перлитной стали с учетом микроструктурного строения / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов, О.П. Ширяев, М.В. Зайцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 3. С. 106–114.
13. Исследование макро- и микромеханики деформирования перлитной стали в многостадийных технологиях производства арматурных канатов / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов, М.В. Зайцева, О.П. Ширяев, Д.Г. Емалеева // СТАЛЬ. № 7. 2018. С. 44-48.
14. Toribio J., Gonzalez B., Matos J. Microstructure and Mechanical Properties in Progressively Drawn Pearlitic Steel. Materials Transactions, 2014, vol. 55, pp. 93-98.

Сведения об авторах

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, руководитель молодежной лаборатории «Лаборатория инжиниринга передовых метизных технологий», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: const_dimon@mail.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Столяров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, начальник технологического центра – главный технолог, ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Язвенко Андрей Михайлович – главный специалист технологического центра ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Савельева Ирина Александровна – доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования»? ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: irinasav17@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MULTISCALE MODELING OF HIGH-STRENGTH WIRE DRAWING PROCESS WITH MICROMECHANICS REPRESENTATION OF PEARLITE MICROSTRUCTURE DEFORMATION

Konstantinov Dmitry V. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Youth Laboratory "Laboratory of Engineering Advanced Hardware Technologies", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: const_dimon@mail.ru

Korchunov Alexey G. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru

Stolyarov Alexey Yu. – Candidate of Technical Sciences, Chief Process Engineer – Head of the Technology Center, OJSK «Magnitogorsk hardware and sizing plant “ММК-МЕТИЗ”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Yazvenko Andrey M. – Senior Specialist of the Technology Center, OJSK «Magnitogorsk hardware and sizing plant “ММК-МЕТИЗ”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yazvenko.am@mmk-metiz.ru

Savelieva Irina A. – Associate Professor of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: irinasav17@yandex.ru

Abstract. The paper presents results of computer-based multiscale finite element modeling of the drawing process of high-strength wire with a pearlitic microstructure, intended for use as the core of steel-aluminum conductors. The methodology and results of the drawing process simulation using the SIMULIA Abaqus software suite are described, taking into account different orientations of cementite lamellae in the wire's microstructure relative to the drawing axis, as well as interlamellar spacing. Based on the simulation results and structural evolution predictions, various wire drawing routes with different distributions of individual reductions are analyzed.

Keywords: High-strength wire, wire drawing, multiscale modeling, microstructure, cementite lamellae, orientation

Ссылка на статью:

Мультимасштабное моделирование процесса волочения высокопрочной проволоки с учетом микромеханики деформирования перлитной микроструктуры / Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Столяров А.Ю., Язвенко А.М., Савельева И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №2(53). С. 43-50.

Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Stolyarov A.Yu., Yazvenko A.M., Savelieva I.A. Multiscale modeling of high-strength wire drawing process with micromechanics representation of pearlite microstructure deformation. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 53, no. 2, pp. 43-50.