

Даниил Олегович Соболев^{1*}, Юрий Николаевич Логинов¹

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**hfsdlk@mail.ru*

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛОСКОМ ПРОКАТЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Остаточные напряжения после операций обработки имеют большое значение. При обработке полуфабриката, связанной со снятием поверхностных слоев металла или вырезкой детали, может произойти деформация, связанная с нарушением баланса остаточных напряжений в заготовке. После деформации заготовка может не соответствовать требованиям или допускам на геометрические размеры. Необходимо прогнозирование наличия остаточных напряжений в момент выпуска продукции и при дальнейшей технологической обработке. Это возможно при использовании существующих программных средств расчета с привлечением метода конечных элементов. Для этого следует обеспечить постановку краевой задачи для материала, обладающего упругопластическими свойствами.

Ключевые слова: остаточные напряжения, алюминиевые сплавы, плоский прокат, лист, плита, метод конечных элементов.

Daniil O. Sobolev, Yuriy N. Loginov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

RESIDUAL STRESSES IN ALUMINUM ALLOYS FLAT-ROLLED PRODUCTS

Residual stresses after processing operations are of great importance. When processing a semi-finished product associated with the removal of surface layers of metal or the cutting of a part, deformation may occur due to an irregularity of the balance of residual stresses in the workpiece. After deformation, the workpiece may not meet the requirements or tolerances for geometric dimensions. It is necessary to predict the presence of residual stresses at the time of production and during further machining processing. This is possible when using existing software calculation tools involving the finite element method. To do this, it is necessary to ensure the formulation of a boundary value problem for a material with elastic-plastic properties.

Key words: residual stresses, aluminum alloys, flat-rolled products, sheet, plate, finite-element method.

Остаточные напряжения в металле после операций обработки металлов давлением или операций термической обработки имеют большое значение в

условиях эксплуатации изделий. Большое внимание уделяется прогнозу развития остаточных напряжений в трубах [1,2], проволоке [3] и в листовом прокате [4,5]. Финишная обработка холоднокатаных листов часто осуществляется с использованием либо растяжных машин, либо роликотправильных машин, либо приема дрессировки в валках большого диаметра, при этом могут быть наведены дополнительные остаточные напряжения [6], хотя целью правки часто является как раз снятие внутренних напряжений. Во многих научных работах отмечается, что если последующая обработка листового материала связана со снятием или дополнительной обработкой поверхностного слоя металла, то можно получить потерю плоскостности листа. А это происходит потому, что в снятом слое был свой уровень остаточных напряжений, и они уравнивали другие остаточные напряжения в заготовке. Снятие поверхностного слоя нарушает существующий баланс.

Изменение плоскостности листа может происходить и при продольном раскрое листа. На рисунке 1 показана деформация части листа из сплава 5083 в состоянии H111 толщиной 4 мм после лазерной вырезки из листа деталей сложной формы.



Рис. 1. Потеря плоскостности листа 5083 H111 толщиной 4 мм после резки

Внутренние напряжения в более толстых полуфабрикатах – плитах могут возникать при закалке по причине неравномерного охлаждения как по длине, так и по толщине проката [7].

Эксплуатация продукции из алюминиевых сплавов связана с непрерывным процессом старения металла. Поэтому в течение срока эксплуатации остаточные напряжения имеют возможность перераспределяться в объеме заготовок, в том числе в виде плоского проката. Это приводит к мысли о необходимости прогнозирования остаточных

напряжений как в момент выпуска продукции, так и по срокам ее эксплуатации.

Для прогноза наличия остаточных напряжений возможно использование существующих программных средств расчета с привлечением метода конечных элементов, например, это модули DEFORM, QFORM, РАПИД и др. Для этого следует обеспечить постановку краевой задачи для материала, обладающего упругопластическими свойствами. На первом этапе следует нагрузить объект с помощью задания соответствующих граничных условий либо за счет воздействия на него инструментов. На втором этапе разгрузить объект, в результате в поле зрения окажется распределение остаточных напряжений. В некоторых случаях разгрузка может быть достигнута самопроизвольно. Например, в задаче волочения может оказаться, что заготовка уже покинула рабочий инструмент [3]. Та же ситуация возникает при окончании процесса прокатки. Однако в других случаях эта ситуация может не возникнуть. Например, при кузнечной осадке придется устранить специально воздействие инструмента на заготовку. Та же ситуация возникнет при растяжении заготовки или образца. Здесь понадобится перейти ко второму этапу и запланировать специально шаг разгрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буркин С. П. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С. П. Буркин [и др.] // Достижения в теории и практике трубного производства : Материалы 1-й Российской конференции по трубному производству. 2004. С. 87-97.
2. Розенбаум М. А. Влияние финишных операций на остаточные напряжения и поверхностный наклеп в трубах. М. А. Розенбаум [и др.] // Производство проката. 2014. № 9. С. 28-32.
3. Логинов Ю. Н. Формирование остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки / Логинов Ю. Н., Грехов С. К. // Сталь. 2021. № 5. С. 25-28.
4. Nakhoul R. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling / R. Nakhoul, P. Montmitonnet, M. Potier-Ferry // International Journal of Solids and Structures. 2015. V. 66. 2015. P. 62-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028>.
5. Mehner T. Residual-stress evolution of cold-rolled DC04 steel sheets for different initial stress states / T. Mehner [and etc.] // Finite Elements in Analysis and Design. 2018. V. 144. P. 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.11.006>.
6. Максимов Е. А. Разработка методики расчета остаточных напряжений и параметров пружинения листа на роликовой правильной машине / Е. А. Максимов, Р. Л. Шаталов, В. Г. Шаламов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 1. С. 14-20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-14-20>.
7. Александров А. А. Прогнозирование остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов / А. А. Александров // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. С. 128.

REFERENCES

1. Burkin S. P. Analysis of methods for determining and eliminating residual stresses in pipe workpieces / S. P. Burkin [and etc.] // *Dostizheniya v teorii i praktike trubnogo proizvodstva : Materialy 1-j Rossijskoj konferencii po trubnomu proizvodstvu*. 2004. P. 87-97.
2. Rozenbaum M.A. The effect of finishing operations on residual stresses and surface hardening in pipes / M. A. Rozenbaum [and etc.] // *Proizvodstvo prokata*. 2014. № 9. P. 28-32.
3. Loginov Yu. N. Generation of residual stresses in drawing low-carbon steel wire / Yu. N. Loginov, S.K. Grekhov // *Steel*. 2021. № 5. P. 25-28.
4. Nakhoul R. Multi-scale method for modeling thin sheet buckling under residual stresses in the context of strip rolling / R. Nakhoul, P. Montmitonnet, M. Potier-Ferry // *International Journal of Solids and Structures*. 2015. V. 66. 2015. P. 62-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.03.028>.
5. Mehner T. Residual-stress evolution of cold-rolled DC04 steel sheets for different initial stress states / T. Mehner [and etc.] // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2018. V. 144. P. 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.11.006>.
6. Maksimov E. A. Calculation of residual stresses and parameters of sheet springing on roller leveler / E. A. Maksimov, R. L. Shatalov, V. G. Shalamov // *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021. V. 64. №1. P. 14-20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-14-20>.
7. Aleksndrov A. A. Forecasting of residual stresses under heat treatment of aluminum alloys / A. A. Aleksndrov // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2015. №4. P. 128.