

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОДАВЛЯЮЩЕГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ

Jozef HRABOVSKY , Jaroslav HORSKY

Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, VUT Brno,
Technicka 2, 619 69 Brno, Czech Republic, yhrabo01@stud.fme.vutbr.cz

Перевод: Зайцев К.Н.

АННОТАЦИЯ

Удаление окалины является необходимой частью процесса прокатки, когда требуется очистить поверхность заготовки до контакта с валками. Наиболее широко используемыми методами для удаления окалины являются гидравлические или механические методы. Удаление окалины струей жидкости под давлением в настоящее время является наиболее распространенным методом. Окалина может быть очень разнообразна по химической связи и механическим свойствам. В принципе, ее можно разделить на первичную, которая формируется в специфических условиях печи, и вторичную, возникающую при контакте с воздухом. В данной статье рассматривается моделирование гидравлического удаления вторичной окалины.

Для имитации гидравлического удаления окалины, был выбран численный анализ Ansys, с помощью которого было классифицировано влияние тепловых и механических напряжений на структуру окалины. Численное моделирование удаления окалины струей жидкости под давлением было проведено в два этапа: первым шагом было моделирование с так называемой точки зрения «макро» – когда ударное воздействие струи жидкости было смоделировано в виде непрерывной функции теплообмена. Эта функция была измерена экспериментально во время исследований кпд сопел. Вторым шагом было моделирование с позиции «микро», когда моделировался очень короткий, но интенсивный импульс переноса тепла на небольших площадях. Этот подход представляет собой высокоскоростной удар одной капли воды. Изучая эти два аспекта, можно сравнить влияние отдельных компонентов, механических и термических, на напряжение в слое окалины. Такое сравнение показывает, какой из этих компонентов имеет большее влияние на этот процесс, в результате чего возможна разработка стратегии для гидравлического удаления окалины с целью обеспечения эффективности процесса и качества обрабатываемой поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышенный спрос на продукты с хорошим качеством поверхностных слоев без остаточных окислов и дефектов проката приводит сталелитейную промышленность к поиску вариантов и методов для выполнения этих требований. Для достижения этих целей нам необходимо изучить механизм возникновения оксидов, а также механизм их устранения. Появление оксидов очень непростой процесс, который сопровождается ухудшением качества поверхности и ее деградацией в виде микротрещин или ядер. Есть много механизмов для удаления оксидов. Для удаления первичной окалины используются химические или механические методы. Для вторичной окалины – в основном механические и гидравлические методы. Данная статья рассматривает гидравлический механизм удаления вторичной окалины. Вторичная окалина образуется после извлечения стали из печи, во время транспортировки на воздухе. Вторичная окалина, как правило, состоит из трех слоев химических веществ: FeO (вюстит), гематит (Fe_2O_3) и Fe_3O_4 (магнетит). Эти слои формируются при различных температурах. Магнетит и гематит образуются когда окисление ниже $570^\circ C$. Содержание вюстита повышается, если температура становится свыше $570^\circ C$ [1]. Толщина вторичных оксидов не слишком велика из-за короткого времени окисления. Значения толщины колеблются в пределах 20-50 мкм. Процесс удаления окалины можно разделить на две составляющие: Первый компонент – термический. Он представлен градиентом температуры между сильно охлажденным, тонким верхним слоем и остальными

массивными горячими частями стали. Второй – механический компонент, что обусловлен высоким давлением струй воды. Цель этой статьи заключается в определении влияния этих двух компонентов на конечное качество поверхности во время процесса очистки. Для достижения значимых результатов был выбран метод численного моделирования – метод конечных элементов. Мониторинг каждого компонента был принят в двух аспектах. С точки зрения «макро» - когда гидравлическое удаление окалины считалось как струя воды с определенным коэффициентом теплопередачи, и ударной силой. С точки зрения «микро» - когда струя воды из гидравлического удаления окалины была разложена на капли воды. Капле воды были определены значения теплоотдачи и ударная сила.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ ВСЕСТОРОННИЙ АНАЛИЗ

Сравнение воздействия тепловых и механических компонентов на гидравлическое удаление окалины с поверхности стали, рассматриваемое в течении моделирования с «макро» и «микро» аспектов.

Для достижения поставленных целей было выбрано численное моделирование по программе ANSYS. Как уже упоминалось во введении, механизм удаления окалины был разложен на тепловую и механическую часть. Для «макро» аспекта, теплообмен функции и влияние давления струи воды были определены в качестве существенных факторов. Оба были взяты из реального эксперимента (см. раздел 3.1). Определение существенных факторов для «микро» аспекта количественно сопоставимо с факторами, перечисленными для «макро» аспекта. Они качественно отличаются, потому что исходят от способа моделирования, указанного в статье (см. раздел 3.2), факторы представляют собой значения теплоотдачи и влияние давления одной капли воды.

3. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Этот раздел базируется на входных данных, взятых из реальных экспериментов, однако также используются данные, основанные на расчетах и численном моделировании, взятые из статей и литературы.

3.1 Экспериментальные данные

Измерения, на основе которых берутся входные данные для анализа, были проведены в The Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory. Было произведено два типа измерения. В первом случае коэффициент теплопередачи (НТС) измерялся для характеристики интенсивности охлаждения струей воды. Во втором случае измерялась ударная сила давления, представляющая собой силу давления струи воды. Измерения проводились не в рамках этой работы, они упоминаются в документе [2].

3.2 Взятые из литературы

Эти данные особенно активно используются в расчетах для «микро» аспекта, в котором рассматривалось значение коэффициента теплопередачи и влияния давления для одной капли воды. Данные, представляемые переменными, были либо вычислены, либо частично измерены. Исследования, в которых были получены эти данные, приведены в соответствующих публикациях [3], [4]. Этот тип данных также включает в себя свойства материала стали [5], [6] и окалины [7], [8], которые также были использованы. Конкретные значения приведены в пункте 4.3.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для решения этой проблемы (см. главу 2), был выбран метод FE в ANSYS 12. Как уже упоминалось во введении, вопрос был рассмотрен в двух аспектах. «Макро» и «микро»,

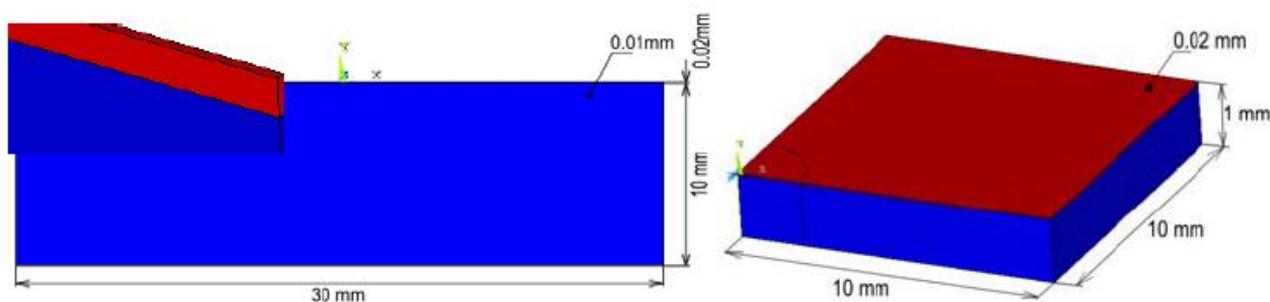
которые в то же время могут быть разделены каждый на две группы. Первая группа – анализ теплового стресса, где в граничных условиях (Г.У.) производится оценка температуры образца(модели), формирующая функцию коэффициента теплоотдачи. Вторая группа – структурный анализ, где формируется функция воздействия давления.

4.1 Процедура принятия решений

Процедуры принятия решений была выбрана на основе поставленных целей. Выбранное в качестве метода решения численное моделирование, проводилось и в «макро» и в «микро» аспектах. Оба подхода имеют качественно те же самые результаты, которые могут быть согласованы. Для «макро» аспекта использовались экспериментально измеренные Г.У. (см. раздел 4.4.1) и были созданы соответствующие геометрические модели (см. главу 0). Для микро аспекта, граничные условия (см. раздел 4.4.2) были представлены данными из литературы, и также была подготовлена геометрическая модель. Для обоих подходов были использованы идентичные модели материальных данных. После создания всех необходимых моделей был сделан переходный термический анализ. В результате этого анализа получено распределение температурного поля в модели. На основе этих данных был выполнен стресс анализ. Структурный анализ - еще один параметр, рассчитанный в результате моделирования. Эти процедуры выполнялись как для «макро», так и для «микро» аспектов.

4.2 Топология и геометрия модели

Геометрическая модель была подготовлена на основе предыдущих расчетов с учетом геометрии образцов, используемых в The Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, для экспериментов по удалению окалины или измерения теплопередачи. Геометрическая модель состоит из двух частей. Первую надежную часть составляет основной материал (сталь), а вторая часть состоит из тонкого слоя окалины. Слой окалины менее структурирован и непрерывен. Эта структура является одинаковой для обоих аспектов, но она отличается



геометрическими размерами (см. рис. 1).

Рисунок 1 – Геометрическая модель для «макро» и «микро» аспекта

4.3 Материальная модель

Геометрическая модель состоит из двух видов материалов, поэтому было необходимо ввести свойства для обоих. Поскольку рассматривается зависимость температуры и структуры, были использованы свойства материалов в зависимости от нагрева. Свойства стали соответствуют значениям для стали S235 [5], [6]. Свойства окалины соответствуют значения Вюстита (FeO) [7], [8]. Значения свойств для материалов, перечислены ниже (см. табл. 1). Для воздействия на пластическое поведение, была использована билинейная модель материала с изотропным упрочнением.

4.4 Граничные условия и нагрузки

Эта глава разделена на две части, Г.У. для «макро» аспекта и Г.У. для «микро» аспекта. Оба эти раздела делятся на Г.У. и загрузок для теплового и структурного анализа.

Таблица 1 – Свойства материалов

Температура	Удельная теплоемкость	Теплопроводность	Температуропроводность	Плотность	Модуль Юнга	Распределение Пуассона
Свойства материала сталь						
[°C]	[J/kg.K]	[W/m.K]	[m ² /s]	[kg/m ³]	[Pa]	[-]
20	513	12.6	15.8e-6	7800	2.1e11	0.3
100	514	14.0	16.5e-6	7780	2.1e11	0.3
700	580	24.7	19.1e-6	7570	2.7e10	0.3
800	593	26.4	19.4e-6	7540	1.9e10	0.3
900	605	27.8	19.6e-6	7510	1.4e10	0.3
1000	616	29.2	19.8e-6	7480	9.5e9	0.3
Свойства материала окалина						
20	-	-	1.2e-5	5700	2.4e11	0.36
100	-	-	1.2e-5	5700	2.3e11	0.36
700	883	1.7	1.2e-5	5700	1.6e11	0.36
800	913	1.8	1.2e-5	5700	1.5e11	0.36
900	942	1.9	1.2e-5	5700	1.4e11	0.36
1000	972	2.0	1.2e-5	5700	1.3e11	0.36

4.4.1 Г.У. и входные данные для «макро» аспекта

Термические Г.У., были определены как постоянные величины модели, температура которой составляла 1000^oC. Структурные Г.У. соотносились к геометрии модели. Они были выбраны для моделирования реального поведения образца при нагревании и механической нагрузке. Таким образом, в соответствующих областях были назначены Г.У., которые позволяют предотвратить или разрешить перемещения в соответствующем направлении. Исходными данными для модели являются данные, полученные из экспериментальных исследований (см. раздел 3.1). Построенный график НТС функции, (см. рис. 2) был использован для температурных задач. Влияние входных воздействий на структуру образца были представлены графиком функции воздействия давления струи воды на позицию (см. рис. 3).

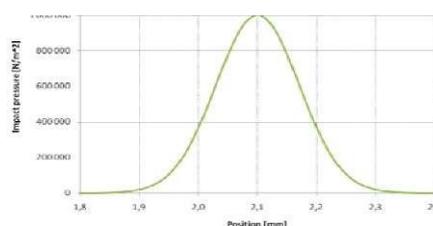
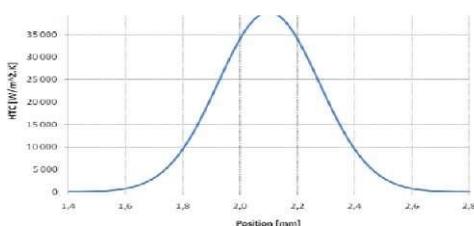


Рис. 2 – Функция НТС для струи воды Рис. 3 – ударная сила струи воды

4.4.2 Г.У. и входные данные, используемые для «микро» аспекта.

Как и в предыдущем случае, тепловые Г.У. были установлены как постоянные значения температуры для модели, температура которой 1000°C. Реальное термическое и механическое поведение образца моделируется идентично предыдущему случаю. Корреспондирующие сдвиги в соответствующих областях были санкционированы или исключены. Входные данные и поведение взято на основе значений из литературы (см. раздел 3.2). Тепловое воздействие представлено линейным графиком НТС с зависимостью от времени (см. рис. 4). Структурное воздействие было представлено линеаризованным графиком влияния давления струи воды в зависимости от времени (см. рис. 5). Воздействия как для температуры, так и на структуру являются очень быстрыми процессами и появляются в мкс.

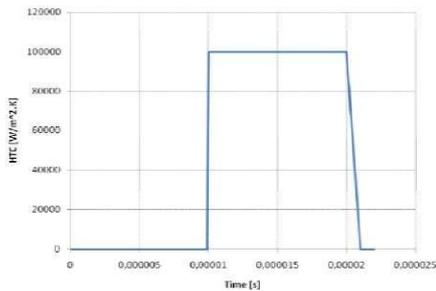


Рис. 4 – НТС водяной капли

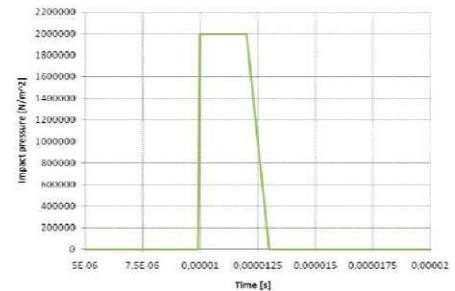


Рис.5 – Ударная сила водяной капли

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы сохранить первоначальную структуру, результаты представлены последовательно в «макро» и «микро» аспектах. Каждый раздел делится на результаты теплового и структурного анализа

5.1 «Макро» аспект

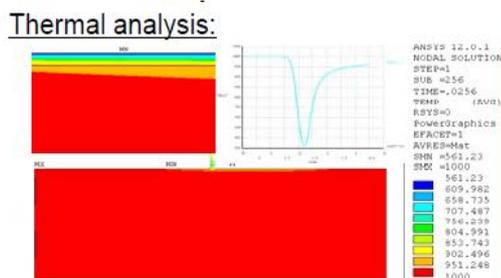


Рис.6 – Распределение температуры

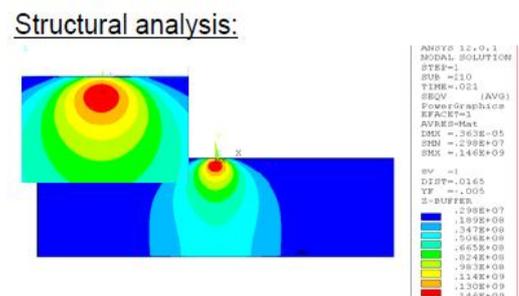


Рис.7 – Эквивалентная нагрузка

5.2 «Микро» аспект

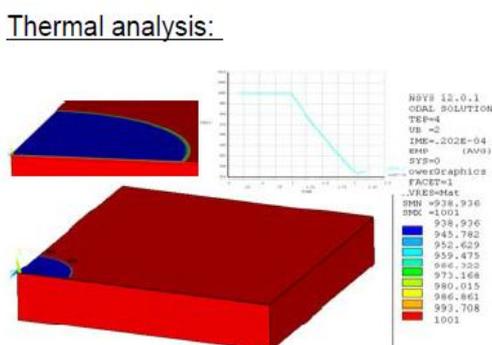


Рис.8 – Распределение температуры

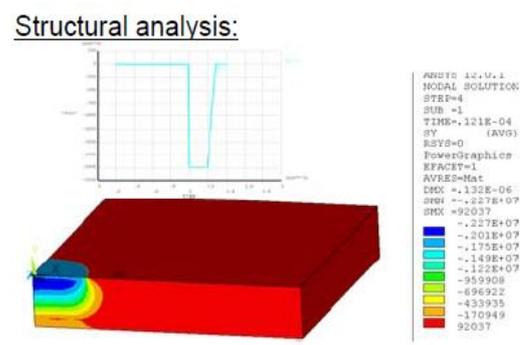


Рис.9 – Сжимающее напряжение

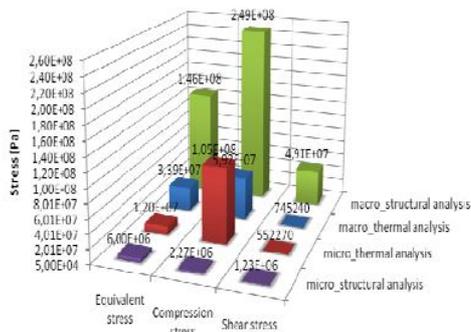


Рис. 10 – Результаты ударной нагрузки для стальных деталей

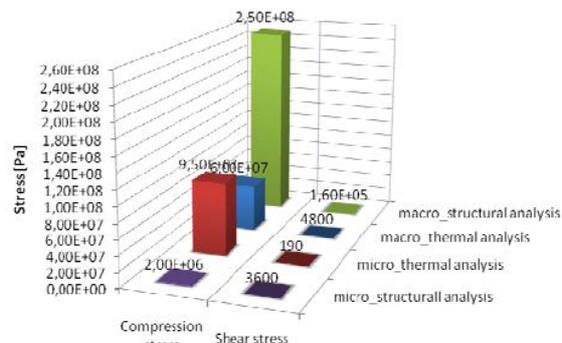


Рис. 11 – Результаты ударной нагрузки для окалины

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было сравнение влияния тепловых и механических компонентов гидравлического удаления окалины с двух точек зрения. Первая: моделирование удаления окалины с точки зрения «макро», в которой был рассмотрен полный гидравлический луч. При таком подходе были найдены значения охлаждения поверхности образца в связи с передачей тепла и последующих значений эквивалента, давления и разрушающих напряжений и от температуры, и от давления. Эти значения были определены как для стальной части модели, так и для части окалины. Иллюстрации результатов даны в разделе 5.1 и показаны на рис. 6 и рис. 7. Во втором подходе, моделирование удаления окалины изучалось с позиции «микро», когда была рассмотрена одна капля из гидравлического радиуса. В этом случае процедура была такой же, как и в предыдущем методе. Наблюдаемыми величинами были поверхностная температура, давление и напряжение сдвига. Результаты этого анализа приведены в главе 5.2 и отдельные значения представлены на рис. 8 и рис. 9. Окончательные результаты делятся на две части. Первая часть показывает результаты стали (см. рис.10), во второй части представлены результаты слоя поверхностной окалины (см. рис. 11). Представленные результаты для «макро» аспекта позволяют предположить, что влияние воздействия давления больше как для напряжений в поверхности слоя окалины, так и на стальной конструкции. Полученные значения напряжений стальной части образца могут быть использованы для оценки напряжения на границе окалины и стали. Результаты для «микро» аспекта, однако, показывают, что в этом случае тепловая нагрузка оказывает большее влияние на общую ударную нагрузку. Но это не столь четко видно, как на первом подходе. Эти выводы, однако, как правило, не могут претендовать на универсальность. Для этого нужно было бы делать большое количество расчетов влияния нагрузки при различных видах насадок, при различных давлениях, толщине весах и т.д. Тем не менее, этот анализ показывает эффект отдельных компонентов нагрузки и указывает на то, что чувствительности параметров тесно связаны с гидравлическим удалением окалины.

REFERENCES

- 1) SZPUNAR, J.A., BAE-KYUN KIM. High temperature oxidation of steel. New description of structure and properties of oxide. *Materials Science Forum*, 2007, Vols. 539-543, pp 223-227.
- 2) HORSKY, J., RAUDENSKY, M., VAVRECKA, L. Experimental study of hydraulic descaling. 5th International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. Sun City, South Africa: HEFAT 2007, paper number: HJ7.
- 3) CHIZOV, ANTON.V., KAZUYOSHI TAKAYAMA. The impact of compressible liquid droplet on hot rigid surface. *International journal of heat and mass transfer* 47, 2004, pp1391-1401.
- 4) RAUDENSKY, M., HORSKY, J., POHANKA, M. et al. Experimental study of parameters influencing efficiency of hydraulic descaling - theory of vapor explosion, 4th Conference on hydraulic descaling. London. 2003, pp. 29-40.

- 5) CSN EN 1993-1, Eurokod 3: Navrhovani ocelovych konstrukci-cast 1,.
- 6) LIENHARD IV, J.H., V LIENHARD V, J.H. A heat transfer text book. Third edition. Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2002. Appendix A.
- 7) KRZYZANOWSKI, M., BEYNON, J.H. Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing-oxide scale behaviour and composition effects. Modelling simul. Mater. Sci. England 8, 2000, pp927-945.
- 8) SCHUTZE, M. Mechanical properties of oxide scales. Oxidation of metals, 1995, Vol.44, Nos. 1/2