

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ TiAl СПЛАВОВ ПРИ СВС-ПРЕССОВАНИИ

Белоконь Ю. А.

В работе рассмотрено влияние напряженно-деформированного состояния на формирование структуры и свойств γ -TiAl сплавов, полученных в условиях СВС-прессования, с помощью компьютерного моделирования в программе Deform. При решении термодеформационной задачи прессования γ -TiAl сплавов в программу были интегрированы реологические свойства γ -TiAl сплавов, полученные экспериментально на комплексе Gleeble-3800, что позволяет проводить численные расчеты кинетических зависимостей основных параметров процесса прессования продукта высокотемпературного синтеза. Процесс экструзии прутка характеризуется напряжением всестороннего сжатия, что обеспечивает γ -TiAl сплавам наилучшие в данных условиях пластические свойства. Результаты моделирования прессования γ -TiAl сплавов позволили зафиксировать четыре отчетливо выраженные зоны, определяющие стадийность структурообразования при СВС-прессовании.

У роботі розглянуто вплив напружено-деформованого стану на формування структури і властивостей γ -TiAl сплавів, отриманих в умовах СВС-пресування, за допомогою комп'ютерного моделювання у програмі Deform. При вирішенні термо-деформаційної задачі пресування γ -TiAl сплавів в програму були інтегровані реологічні властивості γ -TiAl сплавів, отримані експериментально на комплексі Gleeble-3800, що дозволяє проводити чисельні розрахунки кінетичних залежностей основних параметрів процесу пресування продукту високотемпературного синтезу. Процес екструзії прутка характеризується напруженням всебічного стиснення, що забезпечує γ -TiAl сплавам найкращі в даних умовах пластичні властивості. Результати моделювання пресування γ -TiAl сплавів дозволили зафіксувати чотири чітко виражених зони, що визначають стадійність структуроутворення при СВС-пресуванні.

The paper considers the influence of the stress-strain state of the formation of structure and properties of γ -TiAl alloys obtained under SHS-pressing by computer simulation program Deform. In solving the problem of thermo-compression deformation γ -TiAl alloys have been integrated into the program of the rheological properties of γ -TiAl alloys obtained experimentally on complex Gleeble-3800, which allows for numerical calculations of the kinetic dependences of the main parameters of the process of pressing the product high-temperature synthesis. The extrusion process is characterized by the tension bar of hydrostatic compression, which provides γ -TiAl alloys best in these conditions plastic properties. The simulation results pressing γ -TiAl alloys have allowed to fix the four clearly marked zones defining staging of pattern formation in SHS-pressing.

Белоконь Ю. А.

канд. техн. наук, докторант ЗНТУ
belokonura@rambler.ru

ЗНТУ – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

УДК 621.075.8

Белоконь Ю. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ TiAl СПЛАВОВ ПРИ СВС-ПРЕССОВАНИИ

Для нового поколения современных конструкционных материалов необходимы материалы, которые сочетают высокую прочность с низкой плотностью и высокими пластическими свойствами. Большой интерес представляют интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана [1, 2].

Для получения алюминидов титана, наряду с традиционными методами литья и порошковой металлургии, в последнее время стали использовать технологию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3, 4]. Ранее на основе модельных расчетов [5, 6] было показано, что в условиях взаимодействия процессов СВС и динамического компактирования продукта синтеза возможно получение компактного интерметаллического сплава с высокодисперсной структурой, размер зерен в которой значительно меньше, чем в сплавах, полученных методами литья, спекания или ударно-волнового воздействия на синтезированный продукт. Измельчение зерна интерметаллического сплава в процессе его синтеза под давлением происходит в результате пластической деформации продукта синтеза и высоких скоростей охлаждения. Естественно предположить, что более высокую эффективность процесса измельчения зеренной структуры интерметаллического сплава можно достичь при интенсивной пластической деформации синтезированного сплава в процессе формирования зеренной структуры во время высокотемпературного синтеза сплава под давлением. Например, путем экструзии синтезированного интерметаллического сплава через отверстие (калибр) в пресс-форме непосредственно во время высокотемпературного синтеза под давлением (СВС-прессование) [3].

Цель работы – исследовать влияние напряженно-деформированного состояния на формирование структуры и свойств γ -TiAl сплавов, полученных в условиях СВС-прессования с помощью компьютерного моделирования.

Математическое моделирование процессов горячей деформации интерметаллидных γ -TiAl сплавов выполнено с использованием программного комплекса Deform. Программа Deform – мощная система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного поведения металла при различных процессах обработки давлением. Программа основана на методе конечных элементов, одном из самых известных, надежных и применяемых в настоящее время расчетных методов. Автоматический сеточный генератор позволяет строить оптимизированную конечно-элементную сетку, сгущая её в наиболее критичных зонах. Кроме того, программа предоставляет важную информацию о течении материала и распределении температур во время процесса деформирования, позволяет моделировать полный перечень процессов обработки давлением и решать задачи деформирования и теплопередачи [7].

При решении термо-деформационной задачи прессования γ -TiAl сплавов в программу Deform были интегрированы следующие данные:

- реологические свойства γ -TiAl сплавов $\sigma = f(\epsilon, u, T)$, полученные экспериментально на комплексе Gleeble-3800 (рис. 1.) [8], что позволяет проводить численные расчеты кинетических зависимостей основных параметров процесса прессования продукта высокотемпературного синтеза – температуры системы, полноты химического превращения, макроскопической плотности продукта синтеза, уровня упругих напряжений в продукте, скорости его пластической деформации и размера зерна конечного продукта.

- параметры гидравлического пресса согласно паспорту и схеме расположения оборудования;

- деформационные и скоростные (степени деформации, перемещения пуансона и др.);
- температурные и временные (теплофизические характеристики деформируемого и материала технологического инструмента, коэффициенты теплопередачи, излучения, продолжительности пауз и т. д.).

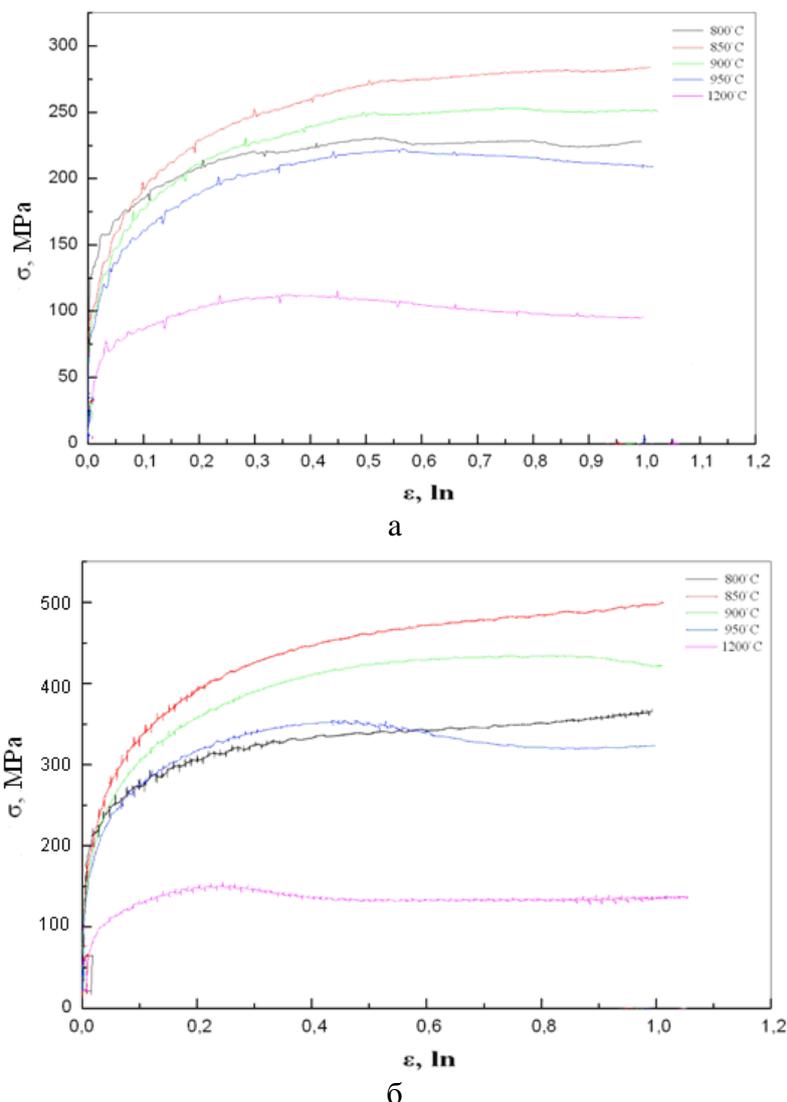


Рис. 1. Результаты физического моделирования термо-деформационной обработки γ -TiAl сплава на комплексе Gleeble-3800: а – скорость деформации, $u = 0,1 \text{ s}^{-1}$, б – $u = 1 \text{ s}^{-1}$

Для моделирования прессования γ -TiAl сплава исходная конечно-элементная сетка состояла из 100 элементов, сгруппированных в прямоугольник по 10 элементов на одну сторону. Рассматриваемый образец представлял собой цилиндр диаметром 60 мм высотой 90 мм.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния TiAl сплавов представлены на рис. 2. Процесс экструзии прутка характеризуется напряжением всестороннего сжатия, что обеспечивает материалу наилучшие в данных условиях пластические свойства. Под воздействием сжимающих напряжений материал течет в направлении наибольшего градиента напряжений – от поверхности пуансона, где они имеют максимальную величину, к очку матрицы, где на свободной поверхности вытекающего материала нормальные напряжения равны нулю. Всестороннее неравномерное сжатие обеспечивает материалу наиболее высокую пластичность по сравнению с другими процессами обработки металла давлением, однако эта положительная особенность процесса проявляется в условиях крайне неравно-

мерных деформаций и скоростей. В этом случае не всегда во всем объеме деформируемого материала действуют только сжимающие напряжения, непрерывно уменьшающиеся в направлении экструзии от максимальных значений до нуля. Наличие разности сечений контейнера и очка матрицы, сил контактного трения и других факторов приводит к тому, что частицы материала начинают двигаться не только в направлениях наибольшей деформации, но и в поперечных направлениях. Последнее способствует возникновению местных (дополнительных) напряжений, различных по величине, направлению и знаку, и появлению растягивающих напряжений. Этому содействуют перемещения частиц материала по траекториям различной длины со скоростью, меняющейся в процессе прохождения их через различные зоны.

Согласно полученным результатам видно, что наиболее уплотненной является центральная часть заготовки, а зоны, прилегающие к торцевым и боковым поверхностям заготовки, являются зонами затрудненной деформации и имеют минимальную плотность. Схема напряжений на заключительной стадии процесса максимально приближается к всестороннему сжатию, что препятствует росту величины интенсивности сдвиговых деформаций и соответствующей ей конечной плотности. Увеличение интенсивности деформаций возможно только с использованием схемы всестороннего неравномерного сжатия на всех стадиях процесса, что положительно сказывается на росте плотности изделий.

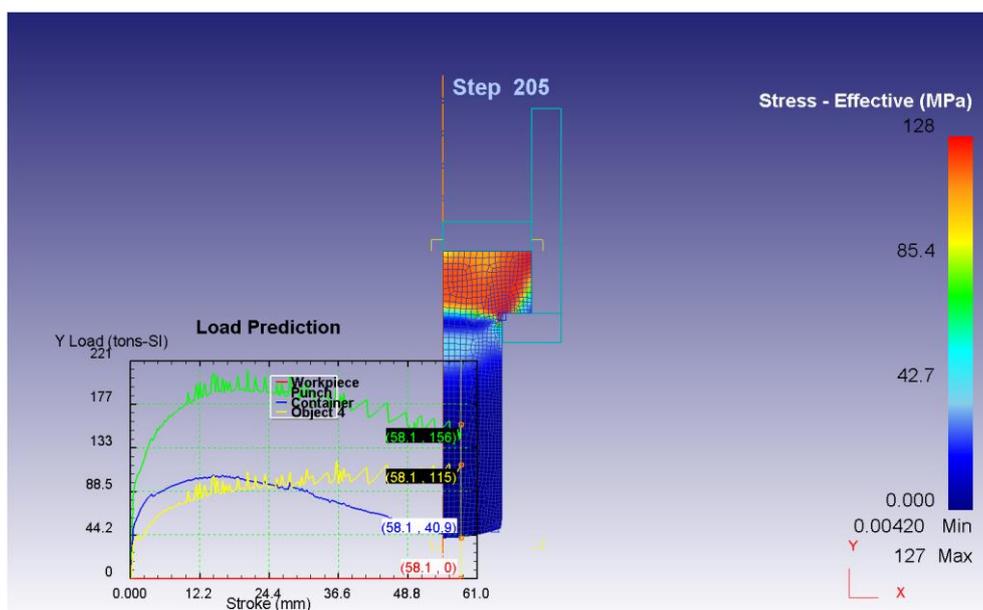


Рис. 2. Моделирование процессов прессования TiAl сплавов

Экспериментальные кривые уплотнения и результаты моделирования прессования TiAl сплавов позволяют зафиксировать четыре отчетливо выраженных зоны, определяющих стадийность структурообразования при СВС-прессовании (рис. 3).

Первая стадия прессования – от насыпной плотности (характеристика исходного материала) до плотности порового уровня, характеризуется преимущественно структурной деформацией, переукладкой частиц, изменением порового пространства. Уплотнение порошковой смеси происходит за счет уменьшения объемов воздушных включений в материале и закрытия макропор.

Вторая стадия – стадия теплового самовоспламенения – отмечается скачкообразный рост относительной плотности, что свидетельствует о некотором самоуплотнении γ -TiAl сплава в процессе синтеза, по-видимому, под действием сил поверхностного натяжения. Происходит начальная стадия структурообразования алюминидов титана.

Третья стадия – уплотнения, характеризуется структурной деформацией. Пороговая плотность стадии 83...95 %. В системе, содержащей 39,6% масс. Al, ранее образовавшийся слой ограничивает перемещения атомов алюминия в титановый материал. При этом происходит наращивание слоя $TiAl_3$, что приводит к обеднению алюминиевой массы и последующему зарождению моноалюминидов титана.

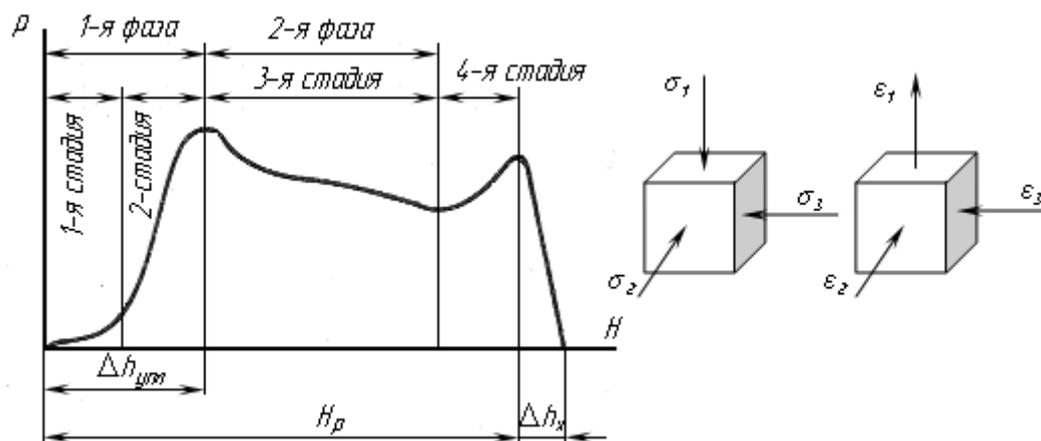


Рис. 3. Механическая схема деформации и нагрузочный график СВС-прессования

Четвертая стадия – заключительная стадия структурообразования; происходит выравнивание состава интерметаллидных слоев, в первую очередь, благодаря перекристаллизации $TiAl_3$ в $TiAl$ и вторичному структурообразованию Ti_3Al в результате растворения внутреннего титанового ядра. В последней стадии уплотнения плотность прессовки достигает 98...99% от теоретической. Остаточная пористость интерметаллида составляет 1...2%.

ВЫВОДЫ

Предложена и реализована методика предварительных исследований, направленная на получение γ - $TiAl$ сплавов с заданной структурой и свойствами, основанная на использовании данных об особенностях физического моделирования термомеханической обработки на комплексе Gleeble-3800 и программном комплексе DEFORM.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имаев В. М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных γ - $TiAl$ сплавов / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, Т. И. Оленева // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1. – С. 25–31.
2. Kim Y. W. In *Microstructure: Property Relationships in Titanium Alloys and Titanium aluminides* / Y. W. Kim, R. R. Boyer. – TMS, Warrendale, 1991. – P. 91.
3. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мерджанов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 567 с. – ISBN 978-5-94275-360-3.
4. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Рогачев, В. И. Юхвид, И. П. Боровинская. – М.: БИНОМ, 1999. – 176 с. – ISBN 5-7989-0126-2.
5. Sereda V. *The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology* / V. Sereda, A. Zhrebtsov, Y. Belokon' // TMS 2010. – Seattle, Washington USA, 2010. – P. 99–105.
6. *The Modeling of Products Pressing in SHS-Systems* / V. Sereda, I. Kruglyak, A. Zhrebtsov, Y. Belokon' // Material Science & Technology. – Pittsburg, USA. – 2008. – P. 827–831.
7. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с. – ISBN 978-5-321-01772-2.
8. Sheyko S. Influence of parameters deformation on the structural phase transitions in steel and Ti-Al alloys / S. Sheyko, Y. Belokon' // Modern science : scientific journal. – Praha, 2015. – № 2. – P. 195–201.