

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СЛАВОВ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DEFORM-3D

Шитиков А.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Технология формообразования металлов в твердожидком состоянии основывается на открытом в 1978 г. М. Флемингом эффекте тиксотропности. Эффект заключается в том, что у сплавов с предварительно подготовленной глобулярной (не дендритной) макроструктурой, находящихся в твердожидком состоянии (в области между линиями солидуса и ликвидуса на диаграмме состояния) значительно снижено сопротивление сдвиговым деформациям.

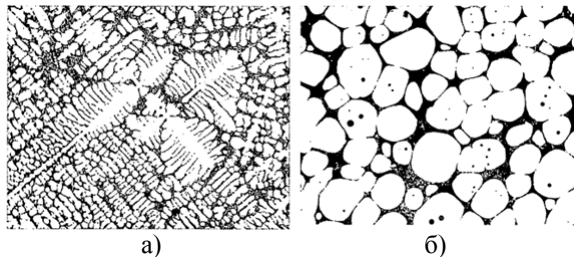


Рисунок 1. Дендритная а) и глобулярная б) макроструктуры металла

Процессы формообразования металлов в твердожидком состоянии позволяют получать за одну операцию поковки сложной геометрической формы, максимально приближенной к форме обработанной детали, обладающие повышенными механическими свойствами.

Структурные особенности течения твердожидкого металла [2]

Структура твердожидкой среды зависит от скорости деформации сдвига $\dot{\gamma}$. При $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_g$ металл в твердожидком состоянии имеет структуру, состоящую из длинных цепочек глобул, характерную для полимерных гелей. С ростом скорости деформации сдвига происходит разрушение цепочек. Их обрывки образуют кластеры, размер которых уменьшается до тех пор, пока при $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s$, среда полностью не разделится на отдельные частицы, т.е. приобретет структуру суспензии. Процессы разрушения структуры среды сопровождаются уменьшением ее вязкости (см. рис. 2 а).

С уменьшением температуры твердожидкой среды продолжается кристаллизация новых зерен, и когда их объемная доля достигает величины f_s^* среда становится квазитвердой, и ее структура перестает зависеть от скорости деформации сдвига (см. рис. 2 б).

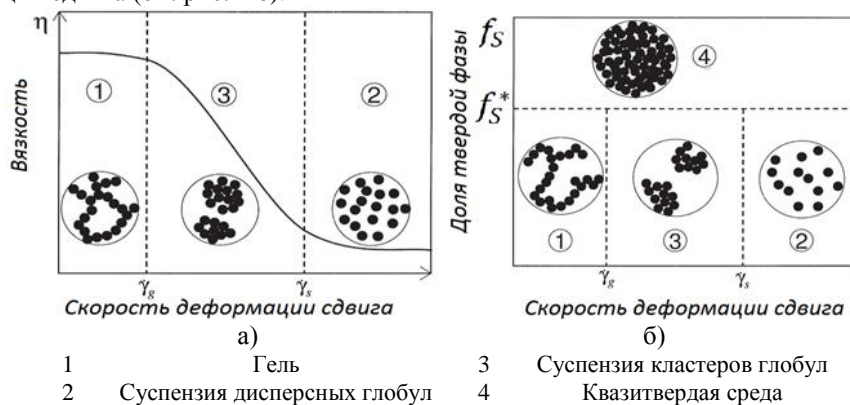


Рисунок 2. Зависимость структуры и вязкости твердожидкой среды от скорости деформации сдвига (а) и объемной доли твердой фазы (б)

Перечисленные процессы изменения структуры твердожидкой среды являются обратимыми, т.е. если суспензию из полностью разделенных жидкостью частиц некоторое время не подвергать силовому воздействию, ее структура вернется к первоначальной, соответственно изменится и вязкость. Наглядно данный процесс самопроизвольного загустевания покоящейся суспензии (т.е. ее агломерация), изображен на рис. 3.

Помимо температуры и скорости деформации сдвига, на изменение структуры твердожидкой среды влияют также диффузионные процессы, которые приводят к укрупнению, как отдельных глобул, так и кластеров из них с течением времени.

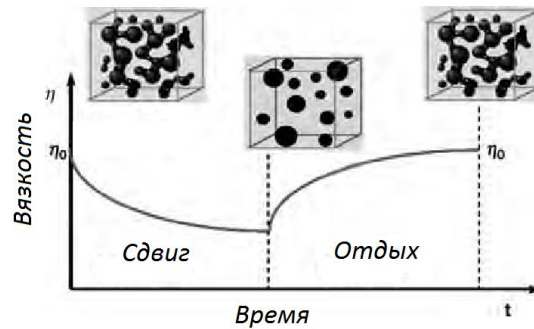


Рисунок 3. Процессы агломерации и деагломерации частиц в твердожидкой суспензии

Реологическая модель твердожидкой среды

Исследователями предложено большое количество реологических моделей твердожидких сред, в разной степени учитывающих перечисленные выше особенности течения. Различают однофазные и двухфазные модели.

В двухфазных моделях рассматриваются отдельно твердая и жидкая фазы со своими законами течения, а также их взаимное влияние. Только используя двухфазные модели течения можно предсказать такое вредное для технологического процесса явление как сегрегация жидкой фазы, т.е. ее вытеснение в труднозаполняемые каналы и полости штампа, что приводит к неравномерному легированию поковки.

В однофазных моделях рассматривается среда с осредненными свойствами, содержание жидкости в которой учитывается с помощью изменения предела текучести. Несмотря на значительное допущение о характере течения однофазные модели могут использоваться для предсказания структурных изменений, таких, как агломерация частиц в суспензии.

Исходными данными для моделей являются параметры, определяемые с помощью сложных лабораторных исследований, сведения о проведении которых для жаропрочных никелевых сплавов отсутствуют в печати.

В данной работе использована однофазная реологическая модель сплава в твердожидком состоянии, учитывающая гидродинамические, структурные и вязкоупругие особенности течения, выгодно отличающаяся от прочих тем, что практически все используемые в ней параметры не требуют экспериментального определения.

Модель представляет собой измененный вариант приведенной в [1]. Упрощения и дополнительные допущения приняты с целью сокращения числа параметров, требующих экспериментального определения. Для получения значений прочих параметров использована демонстрационная версия программы JMatPro (www.sentefsoftware.co.uk).

$$\sigma_s = \begin{cases} \sqrt{3} \cdot \dot{\epsilon} \cdot \eta_T + \frac{f_s \cdot s}{8} \cdot \sigma_{HT} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\epsilon}{\dot{\epsilon} \cdot \tau_M}\right) \right], & \text{при } T_s < T \leq T_L \\ \sigma_{LT}, & \text{при } T \leq T_s \end{cases}$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации,

$\eta_T = f(T)$ – общая вязкость (определяется в JMatPro),

$f_s = f(T)$ – массовая доля твердой фазы (определяется в JMatPro),

s - коэффициент агломерации, зависит от размеров глобул, параметров диаграммы состояния сплава, температуры и скорости деформации. Для определения коэффициента также используются параметры, определяемые в JMatPro: молярный объем, поверхностное натяжение, коэффициент диффузии атомов легирующих элементов в жидкой фазе как функции от температуры,

$\sigma_{HT} = f(T)$ - предел текучести сплава при температурах, близких к температуре солидуса. Параметр определяется в JMatPro по регрессионной зависимости вида $\sigma_{HT} = \alpha + \beta \cdot \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right)$ [3],

ϵ – деформация,

$\tau_M = f(T) = \frac{\eta}{E}$ - постоянная времени Максвелла.

$E = f(T)$ - модуль Юнга.

$\sigma_{LT} = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ – стандартная модель материала используемая в DEFORM.

Программная реализация данной реологической модели осуществлена с помощью пользовательских процедур программного комплекса [DEFORM-3D](#).

Скрытая теплота кристаллизации при моделировании учитывается соответствующим изменением теплоемкости материала.

Пример моделирования

Рассмотрим пример моделирования штамповки в твердожидком состоянии турбинного диска из сплава Inconel 718. Штамповка осуществляется из кольцевой заготовки.

Программа позволяет предсказать появление возможных дефектов при неправильно выбранных размерах заготовки, заключающихся в образовании поверхностных складок, с последующей заштамповкой

оксидной пленки в тело поковки (см. рис. 4 а). Причина дефекта – подствывание заготовки на инструменте, приводящее к значительной разнице в пределах текучести поверхностных и внутренних слоев заготовки.

Другой возможный дефект – нарушение ламинарности течения металла (см. рис. 5) проявляется при неправильно выбранных скоростных параметрах процесса формоизменения.

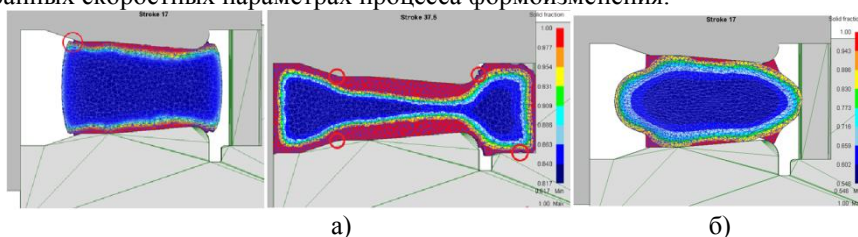


Рисунок 4. Образование поверхностных складок при неправильно выбранных размерах исходной заготовки а), нарушение ламинарности течения при повышении скорости деформирования б)

На рис. 6 приведен пример штамповки при правильно выбранных параметрах технологического процесса. Доля твердой фазы в момент окончания заполнения штампа – 0,708. Как видно из рис. 6б – график изменения силы деформирования не является типичным для операций горячей объемной штамповки. Резкое падение силы деформирования при ходе 17,5 мм вызвано полной деагломерацией твердожидкой среды (см. рис. 7)

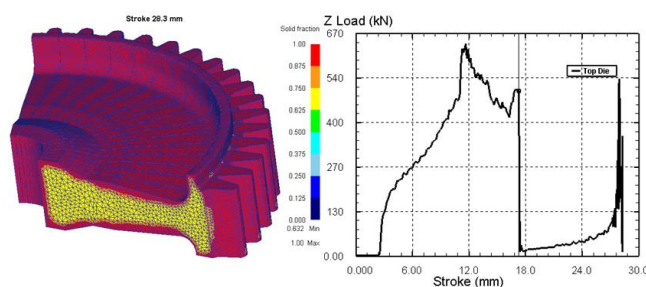


Рисунок 5. Распределение доли твердой фазы в поковке в момент окончания заполнения штампа а) и изменение силы деформирования в процессе штамповки б)

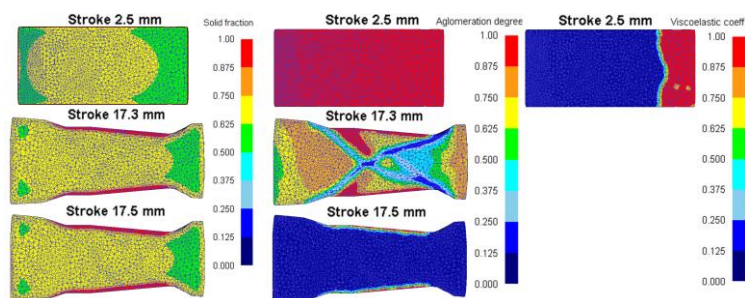


Рисунок 6. Изменение доли твердой фазы а), коэффициента агломерации б) и коэффициента вязкоупругости в) в процессе деформирования

Литература.

1. A. Wahlen. Processing of aluminum alloys in the semi-solid state. Basic principles and constitutive models. Diss. ETH Nr. 14166, 2001
2. Thixoforming. Semi-solid metal processing. Edited by G. Hirt and R. Kopp. – WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 2009
3. Z. Guo, N. Saunders, A.P. Miodownik, J-Ph. Schille. Quantification of high temperature strength of nickel-based superalloys, Material Science Forum, Vols. 546-549, 2007
4. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.