

05.3

## Экспериментальные исследования изменений объема кристаллизующегося металла под высоким давлением

© В.Ф. Коростелев, М.С. Денисов

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия  
E-mail: denisovmaxim90@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 марта 2024 г.

В окончательной редакции 5 июня 2024 г.

Принято к публикации 17 июня 2024 г.

Предложен научно-методический подход к изучению процесса кристаллизации, предполагающий изменение объема кристаллизующегося металла в условиях воздействия высокого давления. Установлено, что для компенсации уменьшения объема металла во время кристаллизации величину давления необходимо приводить в соответствие с сопротивлением металла „сдвиговым деформациям“, обеспечивающим доставку отдельных атомов к кристаллам, в которых возникают дефекты структуры. Результаты измерений использованы при разработке схем наложения давления, а также в расчетах параметров исследовательского и промышленного оборудования.

**Ключевые слова:** диаграммы наложения давления, сжимаемость, вязкость, упругость, дефекты структуры, свойства металла.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58658.19928

В промышленности применение давления как дополнительного параметра внешнего воздействия на металл, кристаллизующийся в слитках или литых заготовках, связано с проблемами как научного, так и чисто технологического характера. В то же время следует обратить внимание на то, что технологии, совмещающие процессы заливки жидкого металла и обработки кристаллизующегося металла давлением, востребованы как перспективные и имеют высокий инновационный потенциал [1,2].

Давление на металл как объект исследования связано одновременно с рядом сложных явлений. В термодинамическом аспекте давление связано с повышением температуры плавления известной формулой Клаузиуса–Клапейрона.

Давление, воздействующее на жидкий металл, способствует увеличению скорости охлаждения и, согласно теории Таммана, увеличивает число центров кристаллизации и скорость их роста. Давление влияет на изменение состава и взаимодействие фаз. С давлением также связаны текучесть, вязкость, пластичность, прочность и упругость металлов. Поэтому целью настоящей работы является установление закономерностей влияния давления на поведение кристаллизующегося металла и на улучшение его физико-механических и эксплуатационных свойств. Для этого в процессе выполнения исследований необходимо рассматривать не отдельные, а взаимосвязанные явления различной природы и разной степени сложности.

Одной из причин отсутствия информации о поведении жидкого металла под давлением до 500 МПа является сложность подготовки и проведения соответствующих экспериментов. Отсутствие результатов количественной оценки свойств расплавленного металла под давлением

является препятствием на пути развития теории жидкого состояния и причиной недостаточного развития физики металлов и металловедения, а также технологий и оборудования металлургического производства.

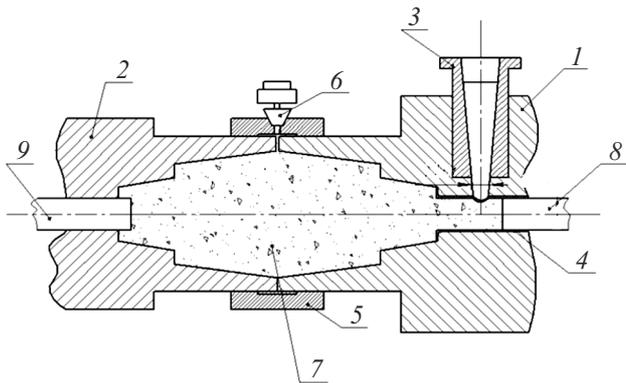
Согласно исследованиям [3], вязкость жидкой фазы существенно не изменяется в процессе затвердевания, несмотря на увеличение содержания растворенных веществ. Твердая фаза в двухфазной области жидкость–твердая фаза ведет себя реологически скорее как жидкость, чем как твердое вещество.

Достоверность результатов экспериментальных исследований и их актуальность в плане практического использования в значительной степени связаны с масштабным фактором. Сложным и неоднозначным становится вопрос выбора формы и размеров опытных образцов.

В качестве исходного материала выбран распространенный авиационный сплав В95. Опытный образец представляет собой цилиндр диаметром 80 мм и высотой 70 мм. Принципиальная схема наложения давления представлена на рис. 1.

Согласно схеме, давление на металл после заполнения полости формы 7 осуществляется плунжерами 8 и 9, каждый из которых приводится в движение с помощью соответствующего гидропривода, развивающего усилие 0.3 МН. В момент, когда плунжер 8 перекрывает заливочное отверстие, включается плунжер 9, и до начала кристаллизации жидкий металл под давлением плунжеров находится в состоянии всестороннего равномерного сжатия. На данный момент указанное состояние не изучено и перспективы его практического использования не определены.

По истечении короткого отрезка времени начиная от поверхностей контакта жидкого металла с плунжерами и со стенками формы вследствие отвода теплоты воз-



**Рис. 1.** Схема процесса. 1 — неподвижная плита пресса, 2 — подвижная плита пресса, 3 — заливочная чаша, 4 — камера прессования, 5 — бандаж, 6 — штуцер для подключения вакуумного насоса, 7 — полость формы, 8 — правый прессующий плунжер, 9 — левый прессующий плунжер.

никают кристаллы. В дальнейшем с ростом кристаллов сопротивление движению плунжеров возрастает. С физической точки зрения возникает вопрос о том, в каком состоянии и в каком взаимодействии находятся атомы металла под давлением.

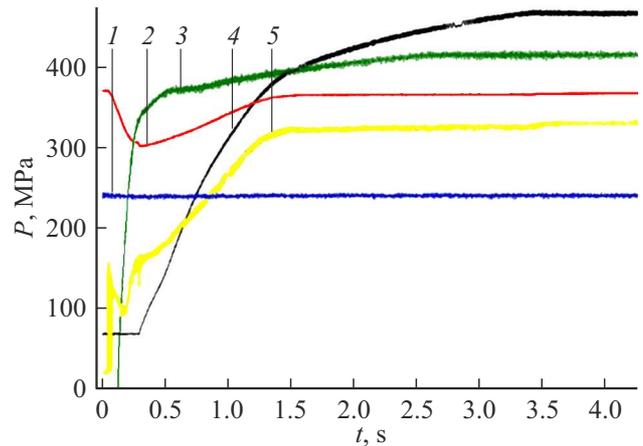
Установлено, что прессующие плунжеры проходят вглубь и запрессовывают при этом значительный объем металла, что опровергает представление о несжимаемости жидкости. Для изучения взаимосвязи между величиной давления и перемещениями прессующих плунжеров разработан и реализован измерительный программно-технологический комплекс [4].

Измерительные сигналы от датчиков после соответствующей обработки зарегистрированы в виде компьютерных циклограмм. В частности, из рис. 2 и 3 следует, что в характере движения плунжеров есть различия, прослеживается также зависимость от давления рабочей жидкости в гидросистеме. Из рис. 3, где данные, полученные после обработки циклограмм, представлены как функции времени, видно, что плунжер 8 в течение  $\sim 2$  с продвинулся в глубь металла на 75 мм, что соответствует сжимаемости металла  $Z_1$  на  $\sim 4.5\%$ . Здесь

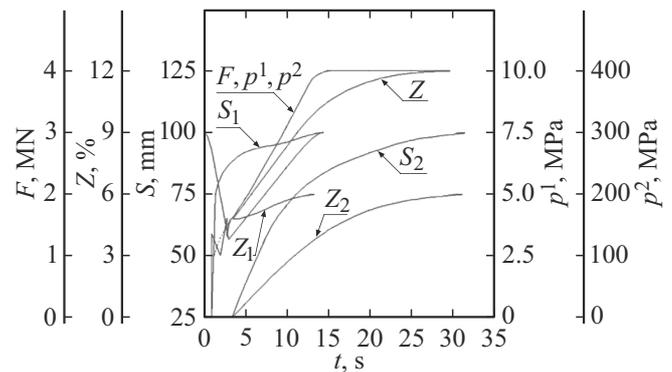
$$Z_1 = \Delta V / V_0 = S_1 f / V_0,$$

где  $S_1 f$  — объем запрессованного металла, равный произведению перемещения плунжера 8 на площадь его поперечного сечения;  $V_0$  — объем залитого в форму металла. К моменту времени  $t = 15$  с перемещение плунжера 8 составило  $S_1 = 100$  мм.

С запаздыванием на 3 с включился плунжер 9, который переместился на  $S_2 = 100$  мм, в результате относительное уменьшение объема залитого металла достигло  $Z = 12\%$ . Установленное значение существенно превышает величину  $\sim 6\%$ , полученную для свободного относительного уменьшения объема алюминиевых сплавов в диапазоне от температуры кристаллизации до комнатной температуры [5]. На основании полученных данных



**Рис. 2.** Компьютерная запись наложения давления и перемещений прессующих плунжеров. 1 — движение подвижной плиты, 2 — усилие запирающей формы, 3 — движение левого прессующего плунжера, 4 — движение правого прессующего плунжера, 5 — давление рабочей жидкости в гидросистеме пресса.



**Рис. 3.** Результаты обработки компьютерной регистрации процесса обработки жидкого и кристаллизующегося металла под давлением.  $F$  — усилие запирающей формы,  $p^1$  — давление в гидросистеме пресса,  $p^2$  — величина давления, накладываемого на металл.

можно представить баланс составляющих уменьшения объемов в следующем виде:

$$\Delta V^G = \Delta V_1 + \Delta V_2 = 6V_0 / 100, \quad (1)$$

$$\Delta V^P = \Delta V_1 + \Delta V_3 + \Delta V_4 = 12V_0 / 100. \quad (2)$$

Уравнение (1) получено для изменения объема  $\Delta V^G$  в процессе кристаллизации и охлаждения в условиях гравитации, а уравнение (2) соответствует изменению объема  $\Delta V^P$  и охлаждению до температуры конца кристаллизации в условиях наложения давления. В формулах (1) и (2)  $\Delta V_1$  — уменьшение объема жидкого металла при охлаждении до температуры конца кристаллизации,  $\Delta V_2$  — уменьшение объема металла при охлаждении от температуры конца кристаллизации до комнатной температуры,  $\Delta V_3$  — уменьшение объема жидкого металла под

давлением,  $\Delta V_4$  — уменьшение объема металла в процессе перехода из жидкого бесструктурного состояния в твердое кристаллическое под давлением. Составляющая  $\Delta V_2$  в уравнении (2) отсутствует, поскольку запись показаний датчиков остановлена в момент окончания кристаллизации. При этом

$$\Delta V_2 = 3\alpha_T \Delta T = 3 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \text{ К} = 4.14V_0/100, \quad (3)$$

где  $\alpha_T$  — термический коэффициент линейного расширения алюминиевого сплава,  $\Delta T$  — интервал от температуры конца кристаллизации до комнатной температуры.

Из уравнения (1) следует, что  $\Delta V_1 = 1.86V_0/100$ . Тогда

$$\Delta V_3 + \Delta V_4 = (12 - 1.86)V_0/100. \quad (4)$$

Уравнение (4) может быть использовано для количественной оценки изменения объема кристаллизующегося металла под давлением. При наложении давления 400 МПа относительное сжатие жидкого и кристаллизующегося металла составляет

$$Z^* = (\Delta V_3 + \Delta V_4)/V_0 \cdot 100 \sim 10\%. \quad (5)$$

Принципиальное значение имеет экспериментально зафиксированный факт, что до начала кристаллизации под давлением  $\sim 100$  МПа объем жидкого металла уменьшился на  $\sim 4.5\%$ . Очевидно, это происходит в результате сближения атомов, которые полностью и (или) частично зафиксированы в процессе броуновского движения. Это состояние металла реализовано технически и технологически, но его влияние на процесс кристаллизации и формирование свойств металлопродукции до настоящего времени не изучено.

Сближение атомов при температуре выше температуры начала кристаллизации, вероятно, изменяет условия межатомных взаимодействий и выделения скрытой теплоты кристаллизации. В подтверждение теории кристаллизации Ландау [6] в работе [7] в сплавах системы Al–Mn, кристаллизация которых осуществляется под давлением, зафиксирована квазикристаллическая фаза. В этом контексте процесс наложения давления на кристаллизующийся металл открывает новые возможности промышленного производства квазикристаллических сплавов специального назначения. В связи с этим одной из важных является задача исследования силового взаимодействия атомов в условиях наложения давления, устанавливающая зависимость взаимного пространственного расположения атомов в закристаллизовавшемся металле от величины и скорости наложения давления. В свою очередь степень совершенства кристаллического строения металла может быть связана с плотностью дислокаций, эффективностью межатомных взаимодействий в процессе нагружения и деформаций. Отсутствие указанных зависимостей является основной причиной нерешенных проблем на пути проектирования и создания материалов с заданными свойствами.

Изучению свойств металлов как в отечественных, так и в зарубежных научных исследованиях уделяется значительное внимание. На основе результатов исследований достигнуты впечатляющие успехи, эффективность использования металлопродукции постоянно повышается.

Вместе с тем современный уровень экспериментальной физики не позволяет проводить исследования свойств металлов в расплавленном состоянии при высоких температурах. Речь идет о теплофизических, химических, механических и других свойствах в их взаимозависимости и взаимодействии или, другими словами, о группе свойств, в которой сжимаемость под высоким давлением предоставляет новую информацию, необходимую для изучения и понимания природы межатомных связей и взаимодействий.

Результаты исследований свойств и поведения жидкого металла под давлением востребованы в разработках новых технологий, оборудования и систем автоматизированного управления производством металлопродукции с новым сочетанием физико-механических свойств. Компенсация объемной усадки кристаллизующегося металла не только устраняет дефекты структуры (поры, раковины, рыхлоты), но и формирует более совершенное взаимное расположение атомов, обеспечивающее высокую герметичность деталей и изделий гидро- и пневмоарматуры, выдерживающих высокое внутреннее давление.

В доказательство высокой герметичности по заказу КБ „Арматура“, Ковров (ныне филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева) по новой технологии было изготовлено 20 корпусов редукторов для работы под давлением 40 МПа. После механической обработки каждый отдельно взятый корпус проходит испытания под пневматическим давлением 50 МПа и в случае „натекания“ — спада давления — выбраковывается. Каждый из 20 изготовленных опытных корпусов прошел испытания под давлением до 100 МПа, был установлен в соответствующую систему и после двух лет работы на полигоне в штатном режиме сохранил структуру и свойства.

Другим примером качественного улучшения свойств металла в результате кристаллизации под высоким давлением является партия из 500 электронагревателей из сплава на основе алюминия со встроенными тэнами, изготовленная по новой технологии по заказу АО „НИКИМТ-Атомстрой“. Время непрерывной безотказной работы увеличено в 5 раз и более.

В настоящее время совместно с ОК „РУСАЛ“ проводятся исследования и выполняются разработки по освоению производства дисков для грузовых автомобилей литьем с кристаллизацией под высоким давлением.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] T. Haga, S. Imamura, H. Watari, S. Nishida, in *Proc. of the JSME 2020 Conf. on leading edge manufacturing/materials and processing*, online (2020), paper LEMP2020-8625, V001T05A013. DOI: 10.1115/LEMP2020-8625
- [2] S. Yarcu, B.-A. Behrens, S. Huebner, T. Schuchardt, K. Dilger, T.P. Meichsner. *Prod. Eng. Res. Devel.*, **16** (5), 223 (2022). DOI: 10.1007/s11740-022-01116-z
- [3] L. Ravi Narayan, R.J. Hebert, *SN Appl. Sci.*, **4** (6), 186 (2022). DOI: 10.1007/s42452-022-05070-4
- [4] М.С. Денисов, В.Ф. Коростелев. *Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та*, № 7 (68), 32 (2018). DOI: 10.30987/article\_5ba8a18a13c5b6.98496387
- [5] R.E. Sanders, J.P. Lyle, D.A. Granger, in *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (Wiley-VCH, 2021), p. 1–50. DOI: 10.1002/14356007.a01\_481.pub2
- [6] Р.Н. Соболев, *Бюл. МОИП. Отдел геологический*, № 5-6, 52 (2021).
- [7] В.Ф. Коростелев, *Поверхностное и объемное упрочнение сплавов* (Новые технологии, М., 2013).