

ОЦЕНОЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ И СТЕРЖНЕЙ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ АНГАРМОНИЗМА

В.А. Смолко, Е.Г. Антошкина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

При изучении поведения хрупких тел, какими являются стержни и формы из синтетических формовочных смесей, при изменении их линейных и/или объемных размеров важная роль принадлежит двум характеристикам материалов – коэффициенту Пуассона σ и параметру Грюнайзена Gr . Первый из них (σ) характеризует стремление материала сохранять в процессе упругой деформации свой первоначальный объем. Второй – параметр Gr является мерой ангармоничности сил, действующих между атомами (молекулами) твердого тела. На практике используется акустический параметр $Gr_{ак}$ и термодинамический $Gr_{т}$. Для синтетических смесей важную роль играет $Gr_{т}$, когда в форму заливается жидкий металл и возникает большой градиент температур на границе металл – форма (стержень), усадочные процессы, изменение линейных размеров. В работе предложены оценочно-аналитические выражения для оценки и расчета коэффициента надежности Nd литейных форм и стержней из синтетических смесей с учетом ангармонизма и использования параметра Грюнайзена Gr_L . Полученные зависимости позволяют прогнозировать возможность получения качественных отливок на стадии расчетов и разработки технологического процесса их изготовления.

Ключевые слова: прочность; синтетические смеси; надежность; ангармонизм.

В процессе заливки формы металлом и формировании отливки, литейная форма испытывает значительные термомеханические нагрузки (большой градиент температур, металлостатическое давление, напряжение усадки и т. д.), которые и вызывают различные напряжения и разрушения формы, как конструкции, и способствуют возникновению в отливках ряда дефектов.

Литейная форма, как конструкция, должна противостоять термомеханическим воздействиям в процессе заливки и формировании отливки, гарантировать качество поверхности, бездефектность (трещины, раковины), массовую и геометрическую точность отливок. После охлаждения отливок в процессе выбивки и очистки формы и стержни должны разупрочняться, обеспечивая низкую прочность и легкость выбивки стержней из отливок и разрушение форм.

В процессе получения отливок в разовых формах из синтетических смесей имеют место две противоположные тенденции. Первая – обеспечить параметры по физико-механическим и нормативно-технологическим требованиям в соответствии с регламентом на изготовление отливок при формообразовании и в процессе заливки и охлаждения отливки. Вторая – напротив, обеспечить разрушение форм и стержней в процессе выбивки и очистки отливок. На основе этих тенденций, подобно принципу неопределенности для микроми-

ра В. Гейзенберга, возможно, сформулировать принцип неопределенности для получения качественных отливок:

$$\Delta X \cdot \Delta Y \leq 1, \quad (1)$$

где ΔX – неопределенность в получении массовой или геометрической точности отливок; ΔY – неопределенность в получении бездефектной отливки (поверхностных или внутренних дефектов).

Эти две противоположные тенденции литейных форм можно прогнозировать, оценивая их термомеханические параметры, как конструкции, способной сопротивляться термомеханическим воздействиям на всех технологических переделах.

Литейная форма со стержнями при заливке сплавом должна быть рассмотрена как квазихрупкая, сложная иерархически организованная система элементов разных масштабов. Эта система эволюционирует в процессе заливки и адаптируется к приложенным воздействиям, а ее элементы способны к самоорганизации.

Для адекватного описания процессов деформации и разрушения форм и стержней, согласно подходу физической мезомеханики [1], необходимо одновременное и взаимосогласованное рассмотрение трех масштабных уровней: микро-, мезо- и макро-. На микроуровне движение имеющихся и возникающих дислокаций обеспечивает развитие процессов при небольших степенях деформации. На мезоуровне дислокации скапливаются у дефек-

тов или пор, что вызывает пластическое течение, которое имеет синергетический процесс и, в конечном итоге, они приводят к макроскопической деформации и разрушению в месте расположения трещин.

Диссипация энергии при росте микротрещин должна сопровождаться локальными экзоэффектами, величина которых будет зависеть, прежде всего, от доли работы пластической деформации, превратившейся в теплоту, размера зоны пластической деформации и скорости роста трещины.

Реальная прочность твердого тела значительно меньше величины, предсказываемой теорией. В настоящее время сформулировались два основных подхода к проблеме прочности твердых тел – статистический и кинетический [2].

В первом случае, когда равновесная структура совпадает с усредненной по тепловым колебаниям, элементарные процессы разрушения протекают в статически неподвижной матрице твердого тела под действием внешних сил, сконцентрированных на различных дефектах структуры – концентраторах напряжений (микротрещины, скопления дислокаций, инородные включения, аутигенные пленки на зернах наполнителя и т. п.). При таком подходе тепловое движение атомов не принимается во внимание, и разрушение представляется как простое механическое преодоление взаимодействия ближайших соседей. Погрешности, связанные с таким приближением, обычно незначительны примерно до 773 К при рассмотрении прочности форм и стержней, и систематически недооценивается теплоемкость и изменение энтропии в реальных литейных формах при заливке их металлом и последующим охлаждении. Однако имеется ряд экспериментальных данных [3], свидетельствующих о возможности бездефектного термофлуктуационного разрушения (в области высоких температур) в силу внутренней, присущей ансамблю атомов неустойчивости.

В основе другого подхода (кинетического) лежит представление о разрушении, как термофлуктуационном процессе, в котором решающую роль играет тепловое движение атомов твердого тела.

В соответствии с кинетической концепцией разрушение твердых тел под воздействием термомеханических нагрузок рассматривается как процесс последовательного разрыва напряженных межатомных связей тепловыми флуктуациями.

Термофлуктуационный разрыв связей обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний атомов. Уровень ангармонических межатомных связей количественно характеризуется величиной параметра Грюнайзена (Gr) [3].

Существует два типа параметров Gr [4]. Один из них термодинамический Gr_T отражает ангармоничность, усредненную по всем колебательным модам. Другой Gr_L – решетчатый опре-

деляется лишь межъядерными колебательными модами, то есть только межмолекулярным взаимодействием.

Параметр Gr_L примерно соответствует акустическому параметру PaO , а параметр Gr_T параметру Карневале – Литовица [5]. В свою очередь, Gr_L и Gr_T выражаются через параметр нелинейности Бейера и потенциал Mu , которые позволяют определить величину соответствующего параметра Gr по зависимости прохождения ультразвука через образцы формовочных смесей от температуры и давления.

Параметр Gr_L определяется по зависимости модуля объемного сжатия от давления по уравнению

$$Gr_L = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial K_T}{\partial p} \right)_T. \quad (2)$$

Для металлов и ионных кристаллов $Gr_L \approx Gr_T$; для полимеров $Gr_L \approx (5 - 20)Gr_T$.

Ангармонически колеблющиеся атомы и группы атомов вносят существенный вклад в тепловое расширение, в деформацию, теплопроводность, и разрушение твердых тел, особенно при высоких температурах и большом градиенте температур.

Синтетические формовочные смеси включают как неорганические, так и органические полимеры, а также различные минералы (основу) кварц, корунд, циркон, оливин и другие технологические ингредиенты.

Кристаллические решетки затвердевших линейных связующих характеризуются сильной анизотропией, кроме того, полимерные решетки содержат большое число атомов, способных к самостоятельным движениям. Поэтому колебания решетки представляют собой сумму характеристических колебаний отдельных атомов и скелетных колебаний.

Скелетные колебания вследствие сильной анизотропии силового поля решеток могут быть подразделены на внутри- и межмолекулярные. При низких температурах форм и стержней, когда возбуждены лишь длинноволновые колебания, роль внутри- и межмолекулярных потенциалов сравнима и полимерная решетка может рассматриваться как трехмерный кристалл. При заливке металла в форму, когда резко возрастает градиент температур на границе металл-форма, доминирующим становится внутримолекулярный потенциал взаимодействия, и в этой области температур полимерный материал можно рассматривать как ансамбль невзаимодействующих линейных «решеток».

Сильное различие в потенциалах внутри- и межмолекулярного взаимодействия в связующих приводит к тому, что ангармонизм для межцепных колебаний, которые определяются ван-дер-ваальсовыми связями между цепями, значительно боль-

ше, чем внутрицепных, контролируемых ковалентными связями вдоль цепей. Очевидно, что четкой границы между этими двумя цепями провести невозможно.

Концепция решающего вклада межцепного взаимодействия в структуре затвердевшего пространственного полимера органического или неорганического связующего определяется ангармонизмом колебаний частиц и нелинейностью взаимодействия между ними через коэффициент Грюнейзена. На основе литературных данных [3, 6] и расчетов в таблице представлены значения Gr_L .

Ангармонизм межмолекулярных ван-дер-ваальсовых сил в большей степени выражен в песчано-глинистых смесях (ПГС), где коэффициент Gr_L изменяется в пределах 9,1–9,4 в зависимости от вида глинистого минерала, меньшая величина соответствует каолиновым глинам, а большая относится к смесям с монтмориллонитовыми глинами.

На различных этапах технологического процесса получения форм и стержней из синтетических смесей используют большое количество показателей (прочность при сжатии, изгибе, срезе, растяжении и т. д.), каждый из которых описывает только определенные физико-механические свойства и показатель прочности.

Для оценки прочности литейных форм и стержней, как интегральной характеристики, предлагается ввести коэффициент надежности Nd . В общем виде Nd определяется из выражения

$$Nd = \frac{\sigma_{\max_{\text{вр}}}}{\sigma_{\theta_2}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\max_{\text{вр}}}$ – предельно допустимые разрушающие напряжения; σ_{θ_2} – максимальные суммарные окружные термомеханические напряжения на опасном участке формы (стержня).

Расчет предела прочности $\sigma_{\max_{\text{вр}}}$ проводился на основе теории В. Вейбулла [7]. По диаграммам напряжений и данных о соотношении $\sigma_{c_{ж}}$ и σ_p смесей, разрушение форм и стержней их синтетических смесей следует рассматривать как разру-

шение хрупких систем. В подобных материалах существует большое число микротрещин и дефектов различной природы. Поэтому можно считать, что неоднородность таких материалов определяется, в первую очередь, наличием в них дефектов различной «опасности» и в данном случае могут быть применены статистические теории хрупкой прочности, основанные на гипотезе «слабого звена».

Учитывая ангармонические эффекты, имеющие место в процессе разупрочнения стержней и форм при заливке металлом, и используя коэффициент Грюнейзена (Gr_L) было получено аналитическое выражение для расчета коэффициента надежности Nd :

$$Nd = \frac{\sigma_{\max_{\text{вр}}}}{\sigma_{\theta_2}} \lg Gr_L. \quad (4)$$

Используя теорию Вейбулла для определения надежности форм и стержней, вероятность P их разрушения можно определить [7, 8] их уравнения:

$$P = 1 - \exp(-B), \quad (5)$$

где B – риск разрушения. B определяют по формуле

$$B = \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV, \quad (6)$$

где V – объем растянутой части формы (стержня); σ – локальные напряжения в произвольной точке формы (стержня); σ_0 – константа смеси, имеющая размерность напряжения; m – показатель, учитывающий неоднородность прочностных свойств смеси в различных участках формы или стержня.

Чем меньше m , тем больше неоднородность прочностных свойств смеси и влияние градиента напряжений на прочность формы (стержня). Зная распределение напряжений в форме (стержне) можно определить B , а затем найти математические ожидания предела ее прочности:

$$\sigma_B = \int_0^{\infty} e^{-B} d\sigma. \quad (7)$$

Учет ангармонизма и применение теории В. Вейбулла при расчете коэффициента надежности Nd , позволяет прогнозировать возможность изготовления качественных отливок на стадии

Значения параметра Грюнейзена Gr_L различных материалов

№	Материал	Величина Gr_L
1	SiO ₂	1,8–1,85
2	Na ₂ O – SiO ₂	
	Na ₂ O – 13 мол. % SiO ₂	2,0–2,1
	Na ₂ O – 33 мол. % SiO ₂	2,6–2,7
3	Фенолформальдегидная смола	7,5–8,0
4	Поливиниловый спирт	8,3–8,6
5	Жидкостекольные смеси	8,8–9,0
6	Песчано-глинистые смеси	9,1–9,4

инженерных расчетов, разработки технологического процесса формообразования и заливки при получении литых заготовок в разовых формах из синтетических формовочных смесей.

Литература

1. Прочность материалов при высоких температурах / Г.С. Писаренко, В.Н. Руденко, Г.Н. Третьяченко, В.Т. Треценко. – Киев: Наукова Думка, 1966. – 795 с.
2. Подстригач, Я.С. Термоупругость тел неоднородной структуры / Я.С. Подстригач, В.А. Ломакин, Ю.М. Коляно. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 368 с.
3. Козлов, Г.В. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров / Г.В. Козлов, Д.С. Сандитов. – Новосибирск: Наука, 1994. – 261 с.
4. Копышев, А.В. Константа Грюнайзена в приближении Томаса – Ферми / А.В. Копышев // ДАН СССР, 1965. – Т. 161, № 5. – С. 1067–1069.
5. Ващенко, В.Я. О коэффициенте Грюнайзена / В.Я. Ващенко // Физика твердого тела. – 1963. – Т. 5. – С. 886–890.
6. Сандитов, В.Д. Ангармонизм колебаний решеток и поперечная деформация кристаллических и стеклообразных твердых тел / В.Д. Сандитов // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 5. – С. 947–951.
7. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл. – М.: Машиностроение, 1964. – 275 с.
8. Исаханов, Г.В. Прочность неметаллических материалов при неравномерном нагреве / Г.В. Исаханов. – Киев: Наукова Думка, 1971. – 178 с.

Смолко Виталий Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической химии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; smolko-2007@mail.ru.

Антошкина Елизавета Григорьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры неорганической химии, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; aeg-2007@mail.ru.

Поступила в редакцию 26 мая 2015 г.

DOI: 10.14529/met150408

ESTIMATED ANALYTICAL EXPRESSIONS OF THERMOMECHANICAL PARAMETERS OF MOLDS AND CORES MADE OF SYNTHETIC MIXTURES ON ACCOUNT OF ANHARMONICITY

V.A. Smolko, smolko-2007@mail.ru,

E.G. Antoshkina, aeg-2007@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the study of the behavior of brittle bodies, such as rods and molds from synthetic molding compounds, during changes of their linear and/or bulk sizes, two characteristics of materials are very important – the Poisson's ratio σ and the Grüneisen parameter Gr . The first shows the tendency of the material to save its original volume during elastic deformation. The second parameter Gr is a measure of the anharmonicity of the forces acting between atoms (molecules) of a solid. In practice, the acoustic and the thermodynamic parameter are used. For synthetic mixtures plays an important role when the mold is filled with liquid metal and a large temperature gradient occurs on the border metal – mold (core), as well as shrink processes and changes in linear dimensions. The article presents assessment and analytical expressions for the evaluation and calculation of the safety factor of molds and cores made of synthetic mixtures, taking into account anharmonicity and using the Grüneisen parameter. The obtained dependences allow to predict the possibility of obtaining high-quality castings at the stage of making calculations and designing the technological process of their manufacture.

Keywords: strength; synthetic mixture; reliability; anharmonicity.

References

1. Pisarenko G.S., Rudenko V.N., Tret'yachenko G.N., Treshchenko V.T. *Prochnost' materialov pri vysokikh temperaturakh* [Strength of Materials at High Temperatures]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1966. 795 p.
2. Podstrigach Ya.S., Lomakin V.A., Kolyano Yu.M. *Termouprugost' tel neodnorodnoy struktury* [Thermoelasticity of Bodies with Heterogeneous Structure]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 368 p.
3. Kozlov G.V., Sanditov D.S. *Angarmonicheskie efekty i fiziko-mekhanicheskie svoystva polimerov* [Anharmonicity Effects and Physical and Mechanical Properties of Polymers]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 261 p.
4. Kopyshv A.V. [Grüneisen Constant in Thomas–Fermi Approximation]. *Doklady AN SSSR*, 1965, vol. 161, no. 5, pp. 1067–1069. (in Russ.)
5. Vashchenko V.Ya. [On Grüneisen Coefficient]. *Fizika tverdogo tela*, 1963, vol. 5, pp. 886–890. (in Russ.)
6. Sanditov D.S., Mantatov V.V., Sanditov B.D. Anharmonicity of Lattice Vibrations and Transverse Deformation of Crystalline and Vitreous Solids. *Physics of the Solid State*, 2009, vol. 51, no. 5, pp. 998–1003. DOI: 10.1134/S1063783409050187
7. Weibull W. *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Oxford et al., Pergamon Press, 1961.
8. Isakhanov G.V. *Prochnost' nemetallicheskih materialov pri neravnomernom nagreve* [Strength of Non-Metallic Materials at Non-Uniform Heating]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 178 p.

Received 26 May 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Смолко, В.А. Оценочно-аналитические выражения термомеханических параметров литейных форм и стержней из синтетических смесей с учётом ангармонизма / В.А. Смолко, Е.Г. Антошкина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 63–67. DOI: 10.14529/met150408

FOR CITATION

Smolko V.A., Antoshkina E.G. Estimated Analytical Expressions of Thermomechanical Parameters of Molds and Cores Made of Synthetic Mixtures on Account of Anharmonicity. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 63–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/met150408