

УДК 621.762:621.777

РАЗРУШАЮЩЕЕ ДАВЛЕНИЕ В МИКРОДЕФЕКТАХ КОНСОЛИДИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. Е. М. Морозов¹, член-корреспондент РАН М. И. Алымов^{1,*}

Поступило 09.08.2021 г.
После доработки 30.11.2021 г.
Принято к публикации 30.11.2021 г.

В работе приведены результаты исследования влияния внутреннего давления газа в поре или в трещиновидном дефекте на величину критического напряжения разрушения. В качестве метода исследования использованы подходы механики разрушения. Получено аналитическое выражение зависимости критического напряжения разрушения от внутреннего давления газа в трещине. Результаты исследования могут быть использованы в области порошковой металлургии и при разработке аддитивных технологий создания новых материалов.

Ключевые слова: микродефект, трещина, пора, внутреннее давление газа, напряжение разрушения

DOI: 10.31857/S2686953521060091

Макродефекты (трещины, поры) влияют на физико-механические, физико-химические, тепло- и электрофизические, магнитные, спектрально-оптические и другие свойства кристаллических и аморфных материалов [1–3, 5]. Особенно значительное влияние макродефекты оказывают на прочность материалов, полученных методами аддитивных технологий [6–8], литья [9, 10], после радиационного воздействия на материалы [11] и сварки взрывом [12]. Давление в трещине оказывает значительное влияние на процессы гидро-разрыва породы при добыче нефти [13]. Явление перепрессовки порошковых компактов, приводящее к формированию в прессовках мелких трещин, которые резко проявляются при спекании, обусловлено превышением оптимального давления прессования.

Цель работы – получение аналитического выражения для оценки влияния внутреннего давления газа в трещине на величину критического (разрушающего) напряжения.

Рассмотрим энергетический критерий начала распространения трещины (критерий разрушения) Гриффитса [14, 15]. Пусть имеется идеально упругое тело (в виде плоскости единичной толщины $t = 1$) с начальным разрезом длиной $2l$ (рис. 1) под действием растягивающего напряжения σ и внутреннего давления p .

Для того чтобы этот разрез стал распространяться (в обе стороны, каждая сторона разреза увеличивается на δl), требуется израсходовать энергию, равную по величине работе, которую надо затратить, чтобы нарушить целостность материала перед кромкой (фронтом) разреза (и образовать новую поверхность трещины площадью $\delta S = 2\delta l \cdot 1$). Эту работу называют удельной работой разрушения $\delta\Gamma = 2\gamma\delta S$, где γ по Гриффитсу – удельное поверхностное натяжение (наличие коэффициента 2 обусловлено образованием двух свободных поверхностей или вязкостью разруше-

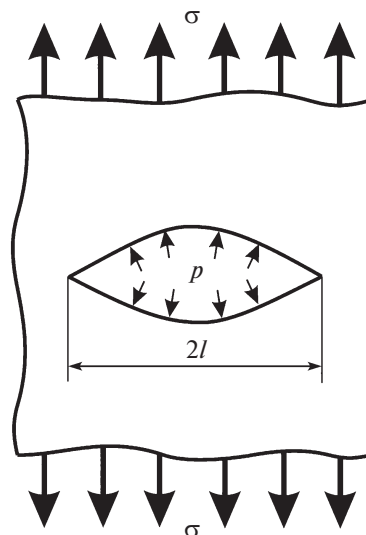


Рис. 1. Начало распространения трещины.

¹ Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова, Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Московская область, Россия

*E-mail: alymov@ism.ac.ru

ния G_C или G_{IC} [15], в которую включена и работа на пластических деформациях, возникающих у фронта трещины).

В процессе образования новой свободной от нагрузок поверхности в объеме тела, окружающем трещину, уменьшаются деформации и напряжения, происходит уменьшение потенциальной энергии деформации пластинки W и соответствующее уменьшение упругой энергии, которая целиком тратится на разрушение (т.е. на образование трещины). Разность потенциальных энергий плоскости с трещиной и без нее получена Гриффитсом на основании решения Инглиса [16]. Этот же результат можно получить из следующих соображений. Принимая, что область снизившихся до нуля напряжений имеет форму эллипса с полуосями, равными длине трещины $2l$ и половине длины трещины l , находим эту разницу

энергий $W = \pi l^2 \frac{\sigma^2}{E}$. Для дальнейшего удобно ввести

поток энергии в вершину трещины $G = \frac{1}{l} \left| \frac{dW}{dl} \right|$.

Кроме того, следует учесть приток энергии δQ за счет специфических макроскопических поверхностных взаимодействий газа, находящегося под давлением в поре, с материалом поверхности поры [17]. Будем считать, что $\delta Q = kp\delta S$, где k – размерный эмпирический коэффициент, p – давление газа в поре.

На основании закона сохранения энергии, пренебрегая иными возможными потоками энергии, при увеличении свободной поверхности трещины на величину δS выполняется энергетическое равенство:

$$\delta G = \delta W + \delta Q \quad \text{или} \quad \delta G - \delta Q = G\delta S. \quad (1)$$

Это равенство относится не к самим энергиям, а к их вариациям, возникающим в результате вариации площади трещины $\delta = \frac{d}{dS} \delta S$. Видно, что трещина начнет распространяться, когда приращение поверхностной энергии компенсируется соответствующим выделением потенциальной энергии деформации и равенство (1) имеет место. Если же потока энергии не хватает для роста трещины, т.е. правая сторона оказывается меньше левой, то трещина не растет. В итоге после подстановки в уравнение (1) всех известных составляющих имеем:

$$2\gamma - \frac{\pi\sigma^2 l}{E} - kp = 0.$$

Отсюда получаем модернизированную формулу Гриффитса для критического напряжения при плоском деформированном состоянии:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E(\gamma - kp)}{(1 - \nu^2)\pi l}}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга материала, ν – коэффициент Пуассона.

При отсутствии внутреннего давления ($p = 0$) формула (2) совпадает с формулой Гриффитса. Наличие внутреннего давления в трещине (поре) приводит к снижению критического напряжения разрушения. Из формулы (2) видно, что внутреннее давление не может превышать некоторого критического значения $p_{кр}$, при котором происходит разрушение материала:

$$p_{кр} = \frac{\gamma}{k} \quad (3)$$

Полученное выражение позволяет объяснить некоторые явления, например, перепрессовку порошков и наличие дефектов в материалах, полученных методами аддитивных технологий. Чрезмерно высокое давление и скорость прессования, а также наличие захваченного воздуха в порах приводит к появлению в спрессованных изделиях трещин. Предварительная дегазация порошков и прессование в вакууме могут предотвратить образование таких дефектов [18]. Появление макродефектов в материалах, полученных методами аддитивных технологий, может быть обусловлено тем, что при термическом воздействии на порошки происходит интенсивное выделение газов, адсорбированных на поверхности частиц, и после оплавления в закрытых порах находится газ под высоким давлением.

Таким образом, впервые получено аналитическое выражение зависимости критического напряжения разрушения от внутреннего давления газа в трещине. Если в закрытых порах находится газ под большим давлением, то закрытая пористость может привести к большему снижению прочности, чем открытая пористость. Для разрушения материала может быть достаточно и одной закрытой поры с большим внутренним давлением. Не исключено, что установка 3D-принтера в камеру с переменным давлением (высокое, низкое) позволит получить изделия, обладающие нужными прочностными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику. М.: Наука, 1993. 112 с.
2. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 192 с.
3. Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1996. 157 с.
4. Ternero F., Guerra L.R., Urban P., Manuel J.M., Cuevas F.G. // Metals. 2021. Vol. 11. № 5. P. 730. <https://doi.org/10.3390/met11050730>

5. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
6. Mathe N.R., Tshabalala L.C., Hoosain S., Motibane L., du Plessis A. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2021. V. 115. P. 3589–3597.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07326-6>
7. Sola A., Nouri A. // J. Adv. Manuf. Process. 2019. V. 1. № 3. e10021.
<https://doi.org/10.1002/amp2.10021>
8. Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Hebenstreit K.M. // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2014. V. 119. P. 494–528.
<https://doi.org/10.6028/jres.119.019>
9. Никитин К.В., Соколов А.В., Никитин В.И., Дьячков В.Н. Инновации в литье по выплавляемым моделям. Самара: СамНЦ РАН, 2017. 144 с.
10. Yang Hm., Guo Zp., Yang Hz., Fu Zh., Pu Zm., Xiong Sm. // China Foundry. 2019. V. 16. P. 232–237.
<https://doi.org/10.1007/s41230-019-9036-3>
11. Ганченкова М.Г., Григорьев Е.Г., Калинин Б.А., Соловьев Г.И., Удовский А.Л., Якушин В.Л. Физическое материаловедение. Том 4. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2021. 624 с.
12. Бердыченко А.А., Первухин Л.Б., Первухина О.Л. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 10. С. 19–24.
13. Каракин А.В. // Физика Земли. 2006. № 8. С. 27–42.
14. Griffith A.A. // Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A. 1921. V. 221. P. 163–198.
<https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
15. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 502 с.
16. Inglis C.E. // Proc. Inst. Naval Architects. 1913. V. 137. P. 3–17.
17. Даль Ю.М. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 827–829.
18. Кингери У.Д. Введение в керамику. Москва: Стройиздат, 1967. 499 с.

FRACTURE PRESSURE IN MICRODEFECTS OF CONSOLIDATED MATERIALS

E. M. Morozov^a and Corresponding Member of RAS M. I. Alymov^{a,#}

^a Merzhanov's Institut of Structural Makrokinetics and Materials Science of Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russian Federation

[#]E-mail: alymov@ism.ac.ru

The aim of the work is to study the effect of the internal gas pressure in a pore or in a crack-like defect on the value of the critical fracture stress. The approaches of fracture mechanics were used as a research method. An analytical expression of the dependence of the critical fracture stress on the internal gas pressure in the crack and the crack opening was obtained. The results of the research might be used in the field of powder metallurgy and in the development of additive technologies for creating new materials.

Keywords: microdefect, crack, pore, internal gas pressure, fracture stress