



УДК 536.4:621.74.01

DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-12-531-536

Е.С. Иванина, В.П. Монастырский  
(Московский политехнический университет)

## Применение критерия Ниямы для прогнозирования усадочной пористости фасонных отливок\*

*Разработана методика определения критического значения критерия Ниямы на основе вычислительного эксперимента. Установлено, что критическое значение критерия Ниямы зависит от условий охлаждения сплава и поэтому применимо только к данному технологическому процессу. Определены критические значения критерия Ниямы для отливок из сплавов МЛ10 и 14Х17Н2Л при литье в постоянные металлические формы и формы из холоднотвердеющих смесей. Полученные результаты подтверждены на фасонной отливке сложной геометрической формы.*

**Ключевые слова:** критерий Ниямы; пористость; компьютерное моделирование; магниевый сплав МЛ10; сталь 14Х17Н2Л; СКМ ЛП "ПолигонСофт".

*Method for determining of the critical value of the Niyama criterion based on computational experiment is developed. It is found that the critical value of the Niyama criterion depends on the alloy cooling conditions and therefore is applicable only to the given technological process. The critical values of the Niyama criterion for castings made of ML10 and 14Kh17N2L alloys obtained in permanent metal moulds and in moulds of cold-hardening mixtures are determined. The obtained results are confirmed on shaped casting.*

**Keywords:** Niyama criterion; porosity; computer simulation; magnesium ML10 alloy; 14Kh17N2L steel; SCM FP "PolygonSoft".

**Введение.** При разработке систем питания отливок с помощью компьютерного моделирования решающее значение имеет прогноз образования усадочной пористости. Помимо прямого моделирования процесса образования пористости часто применяют различные критерии для оценки пористости, в состав которых могут входить теплофизические параметры процесса затвердевания и физические свойства. Наиболее известным является критерий Ниямы [1]:

$$N_y = G / \sqrt{\dot{T}}, \quad (1)$$

где  $G$  — градиент температуры;  $\dot{T}$  — скорость охлаждения; все значения — вблизи температуры солидуса.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90099/19.

Усадочная пористость возникает там, где значение критерия Ниямы меньше критического. На основе расчета критерия Ниямы можно определить область вероятного образования усадочной пористости в отливке, однако количественная оценка пористости невозможна.

Главная проблема при использовании критерия Ниямы состоит в трудоемкости определения критического значения этого параметра для конкретного сплава и технологического процесса экспериментальным путем.

В работе [1] определено критическое значение  $N_y$  для низколегированных сталей. На основе радиографического исследования [2] определены критические значения критерия Ниямы для отливки стальных плит. Критические значения критерия Ниямы для никелевых сплавов и высоколегированных сталей приведены в работе [3], для отливок титанового

сплава Ti—46Al—8Nb, получаемых методом литья в наклонную форму, — в работе [4].

В программе MAGMASoft [5] основным средством для прогноза усадочных дефектов является критерий Ниямы.

На основе теоретического исследования в работе [6] сделан вывод, что образование пористости зависит и от температурно-временных параметров технологии получения отливки и от геометрии отливки. При кристаллизации переходных сечений условия питания двухфазной зоны вблизи внутреннего и внешнего углов будут разными, так как фронт кристаллизации в первом случае будет выпуклым в сторону жидкой фазы, а во втором — вогнутым. Это объясняет, почему при близких значениях критерия Ниямы в разных частях отливки может наблюдаться различная пористость.

Теоретические выводы работы [6] подтверждаются вычислительными экспериментами. В работах [7, 8] на основе вычислительного эксперимента показано, что зависимость между объемной долей пор и критерием Ниямы является неоднозначной из-за влияния кривизны изотермы солидуса.

*Цель работы* — разработка методики быстрого определения критических значений критерия Ниямы для различных сталей и сплавов, а также различных технологий получения отливок взамен трудоемкого экспериментального определения этого параметра.

По данной методике с помощью вычислительного эксперимента определены критические значения критерия Ниямы для сплава МЛ10 и жаропрочной стали 14X17H2Л в отливках в виде плиты при литье в кокиль и в форму из холодно-твердеющей смеси (ХТС). Показано,

что полученные критические значения могут быть использованы для прогнозирования пористости в отливках более сложной формы.

#### Методика вычислительного эксперимента.

С помощью моделирования в системе компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) "ПолигонСофт" [9] проведено исследование связи расчетной пористости с критерием Ниямы в различных технологических процессах.

Механизмы образования усадочной пористости в отливках достаточно хорошо представлены в математических моделях современных программных пакетов. Многолетний опыт применения СКМ ЛП "ПолигонСофт" показал, что при соответствующей настройке модель образования пористости демонстрирует высокую степень адекватности экспериментальным данным [10, 11]. Это позволяет использовать расчетные значения пористости взамен экспериментальных данных, что существенно снижает трудоемкость определения критического значения критерия Ниямы.

Исследовали отливку простой формы в виде плиты размерами 480×140×25 мм. Отливка такой формы имеет следующие преимущества для данного исследования:

- 1) в отливке в процессе кристаллизации образуется один тепловой узел;
- 2) в середине плит есть участок, на котором фронт роста кристаллов поступательно движется от стенок формы к центру отливки.

Эскиз и 3D-модель отливки показаны на рис. 1.

Расчеты проведены для отливок из сплавов 14X17H2Л и МЛ10 при заливке их в кокиль и форму из ХТС. Расчеты выполнены в программе СКМ ЛП "ПолигонСофт" в два этапа.

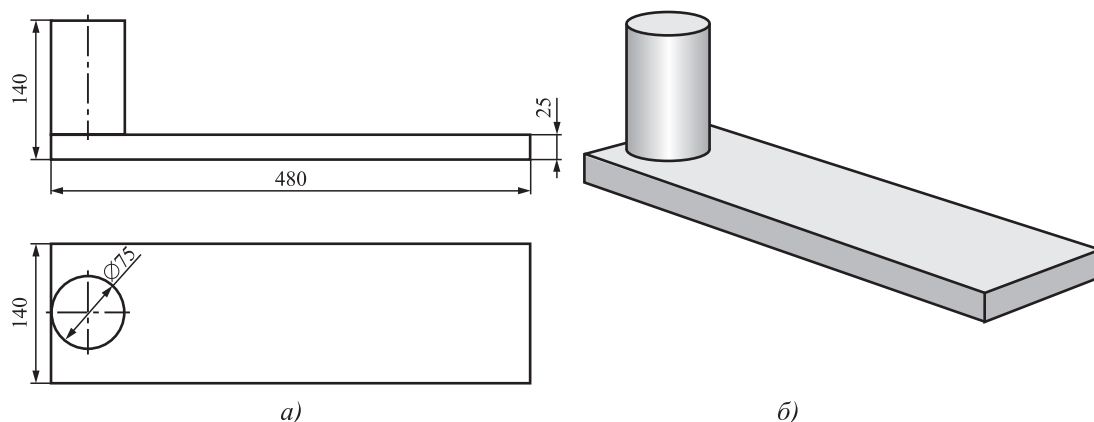


Рис. 1. Эскиз отливки и формы (а) и 3D-модель отливки (б)

На первом этапе проведено моделирование процесса кристаллизации металла для расчета распределения температуры в отливке с заданным временным шагом и получения распределения пористости в затвердевшей отливке.

На втором этапе с помощью модуля "Критерий-3D" СКМ ЛП "ПолигонСофт" выполнен расчет критерия Ниямы. Градиент температуры рассчитан на изотерме  $\theta$  несколько выше температуры солидус:

$$\theta = T_L + 0,1(T_L - T_S)$$

где  $T_L, T_S$  — температуры ликвидус и солидус сплава соответственно.

Скорость охлаждения расплава вычислена как среднее значение за время кристаллизации расплава в двухфазной зоне:

$$\dot{T} = (T_L - T_S)/t_f$$

Локальное время кристаллизации определено как разность времени достижения температуры ликвидус и солидус в данной точке отливки:

$$t_f = (t_L - t_S)$$

Для уменьшения ошибки вычисления градиента температуры моделирование кристаллизации проведено с временным шагом 0,25 с на достаточно мелкой сетке с размером элемента ячейки 1 мм.

Приняты следующие единицы измерения: градиенты температуры  $G$  —  $K \cdot cm^{-1}$ ; скорость охлаждения  $\dot{T}$  —  $K \cdot min^{-1}$ ; критерий Ниямы  $Ny$  —  $(K \cdot min)^{1/2}/cm$ .

Исходные условия для расчета температурных полей и химический состав сплавов 14X17H2Л и МЛ10 приведены в табл. 1—3.

### 1. Исходные температуры металла и формы

Сплав	Температура металла, °С	Материал формы	Температура формы, °С
14X17H2Л	1600	ХТС	20
МЛ10	720	Сталь	300

### 2. Химический состав стали 14X17H2Л, % мас.

С	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Температура, °С	
						ликвидус	солидус
0,05...0,1	0,8...1,5	0,3...0,8	2,8...3,8	15...18	Основа	1490	1270

Исследование проведено на поперечном сечении примерно в середине плиты (рис. 2, см. обложку). Из полученного в результате расчета массива данных были отобраны значения в узлах расчетной сетки, находящихся максимально близко к горизонтальной линии симметрии  $X$  выбранного сечения.

### Результаты исследования и их обсуждение.

В результате расчета кристаллизации в пакете СКМ ЛП "ПолигонСофт" были получены температурные поля для каждого момента времени, и на основании этих распределений рассчитаны распределения критерия Ниямы на изотерме  $\theta$ .

На рис. 3 (см. обложку) показаны распределения объемной доли пористости и критерия Ниямы для сплава 14X17H2Л. На продольном сечении отливки показана только та пористость, которая может быть обнаружена при рентгенографическом исследовании отливки. Известно, что пористость ниже 0,1 % является естественной микропористостью любой отливки и поэтому не является дефектом. Как видно из рис. 3, пористость в пластине является типичной центральной пористостью, образующейся при затвердевании протяженных тонких стенок. Границы зоны пористости существенно зависят от технологии получения отливки. В плите, полученной в форме из ХТС, пористость сосредоточена вблизи оси плиты.

При заливке в кокиль пористость присутствует практически по всей пластине, за исключением узкой области на краях отливки. Важным параметром, влияющим на процесс образования пористости, является интенсивность теплоотвода от кристаллизующегося металла в форму [8]. Чем выше интенсивность охлаждения, тем большая объемная доля усадки локализуется в отливке в виде рассеянной пористости.

Снижение интенсивности охлаждения расплава благоприятно влияет на питание центральной части отливки. В то же время низкая интенсивность охлаждения приводит к уменьшению градиента температуры и, следовательно, к увеличению ширины двухфазной зоны, что затрудняет питание двухфазной зоны отливки.

### 3. Химический состав сплава МЛ10, % мас.

Zr	Zn	Nd	Mg	Температура, °С	
				ликвидус	солидус
0,4...1	0,1...0,7	2,2...2,8	Основа	659	609

На рис. 3, б представлено распределение значений критерия Ниямы для сплава 14X17H2Л. Полученные результаты подтверждают качественную взаимосвязь между критерием Ниямы и вероятностью образования пористости в отливке. В центральной части плиты значения критерия Ниямы существенно ниже, чем вблизи поверхности отливки, т.е. с уменьшением критерия Ниямы вероятность образования пористости увеличивается. Практический интерес представляет задача определения так называемого критического значения критерия Ниямы, ниже которого появление пористости наиболее вероятно.

На рис. 4 приведены зависимости, связывающие объемную долю пор, рассчитанную по модели пористости СКМ ЛП "ПолигонСофт",

с критерием Ниямы. Точки на рис. 4 являются значениями пористости в узлах расчетной сетки, расположенных вдоль центрального поперечного сечения отливки, которое показано на рис. 2. Стрелками указаны критические значения критерия Ниямы.

Полученные результаты позволяют определить критические значения критерия Ниямы для исследуемых сплавов (табл. 4).

Критические значения критерия Ниямы были использованы для определения местоположения зоны усадочных дефектов в отливках простой геометрической формы типа "плита" и в более сложной фасонной отливке с круговой симметрией "рабочее колесо".

На рис. 5 и 6 показаны границы зоны сосредоточения усадочной пористости, определенная

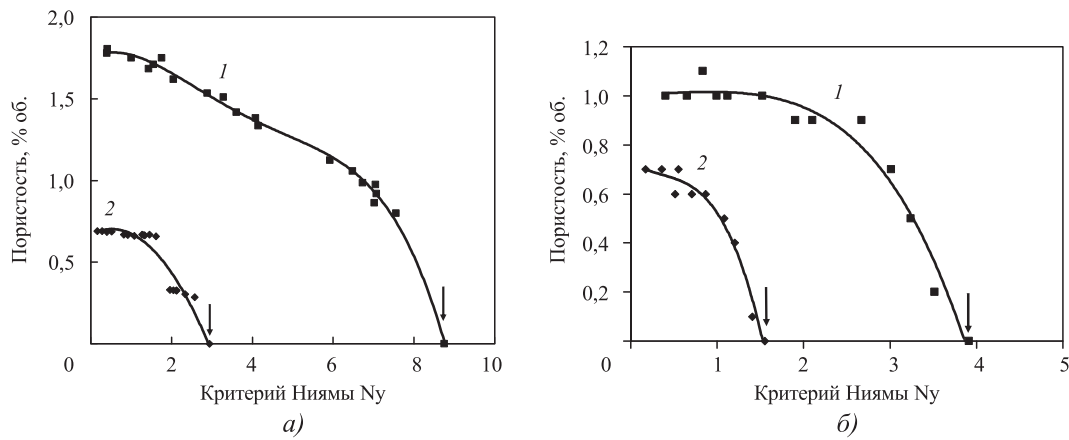


Рис. 4. Объемная доля пористости в зависимости от критерия Ниямы для отливки "плита" из сплавов 14X17H2Л (а) и МЛ10 (б) при литье в кокиль (1) и ХТС (2)

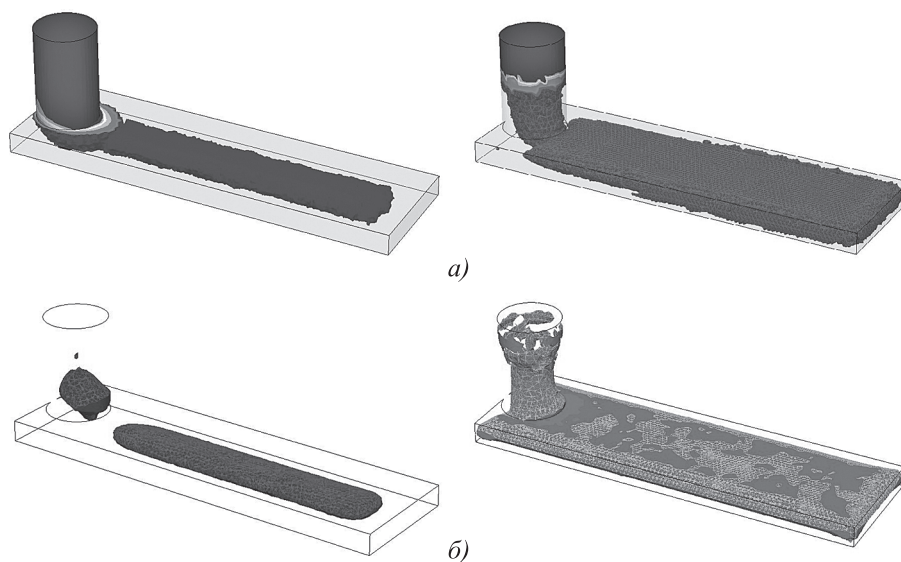
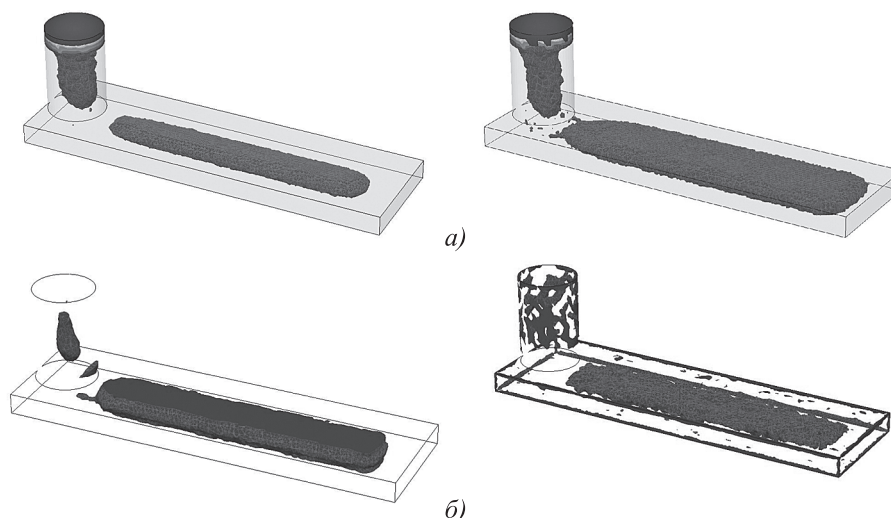


Рис. 5. Зона усадочной пористости в отливке "плита" из сплава 14X17H2Л: а — расчет пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт"; б — распределение критерия Ниямы (значения ниже критического). Слева — ХТС; справа — кокиль



**Рис. 6. Зона усадочной пористости в отливке "плита" из сплава МЛ10:**  
*а* — расчет пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт; *б* — распределение критерия Ниямы (значения ниже критического). Слева — ХТС; справа — кокиль

**4. Критические значения критерия Ниямы при литье в форму из ХТС и стальной кокиль**

Сплав	Критические значения критерия $N_y, (K \cdot \text{мин})^{1/2}/\text{см}$	
	ХТС	Кокиль
14X17H2Л	2,9	8,9
МЛ10	1,5	3,9

двумя способами: прямым моделированием пористости и по распределению критерия Ниямы с учетом полученных критических значений.

Как видно из рис. 5 и 6, местоположение и форма зоны усадочных дефектов в отливке "плита", полученные прямым моделированием пористости в СКМ ЛП "ПолигонСофт" и определением зоны пористости по критерию Ниямы, удовлетворительно совпадают. Наиболее существенные отличия наблюдаются в углах плиты.

В работе [6] сделано предположение, что помимо градиента температуры и скорости охлаждения на пористость влияет кривизна изотермы, на которой определены эти величины.

В работе [8] установлено, что зависимости пористости от критерия Ниямы, полученные для двух серий узлов сетки, взятых вдоль вертикальной и горизонтальной осей отливки, не совпадают. Значения пористости вдоль горизонтальной оси  $X$  выше, чем на узлах, расположенных вдоль вертикальной оси  $Y$  (см. рис. 2). Это объясняется существенным влиянием

кривизны изотермы  $\theta$  вблизи торцов отливки. Критические значения критерия Ниямы практически не зависят от выбора узлов сетки и, следовательно, от кривизны изотерм температурного поля. Это объясняет накопленный положительный опыт использования критерия Ниямы для прогнозирования усадочных дефектов.

Результаты прогнозирования границ зоны усадочных дефектов в сложной фасонной отливке "рабочее колесо" представлены на рис. 7 (см. обложку). Отливка имеет следующие размеры: диаметр 510 мм, высота 277 мм. Моделировался процесс кристаллизации данной отливки из сплавов 14X17H2Л и МЛ10 в форму из ХТС. Начальная температура металла сплава 14X17H2Л — 1650 °С, для МЛ10 — 750 °С.

На рис. 7 приведена пористость выше 0,1 % в отливке и границы сосредоточения усадочной пористости, определенные по критерию Ниямы.

Несмотря на влияние кривизны изотерм на точность прогнозирования зоны пористости с помощью критерия Ниямы, результаты для фасонной отливки с выраженной круговой симметрией вполне соответствуют картине, полученной прямым моделированием пористости, хорошее совпадение в местоположении и конфигурации зоны пористости в плоских элементах конструкции отливки. Образование зон пористости на кромках и во внутренних

углах (см. рис. 7, б, сплав МЛ10) свидетельствует о сильном влиянии кривизны температурного поля. Это влияние выше в случае сплава МЛ10, коэффициент теплопроводности которого в несколько раз выше, чем у стали 14X17H2Л.

Как известно, критерий Ниямы применим только для прогнозирования усадочной рас-сеянной пористости, образующейся в результате фильтрационного течения расплава в дендритном каркасе твердой фазы, т.е. в пределах двухфазной зоны отливки. Критерий Ниямы фактически прогнозирует падение давления в дендритном каркасе, являющееся причиной образования усадочных пор.

Формирование усадочной раковины в при-были отливки происходит вследствие свобод-ного течения жидкого металла вне двухфаз-ной зоны отливки и, следовательно, не может быть связано с критерием Ниямы. Это объ-ясняет полное несовпадение картины пори-стости в прибылях отливки на рис. 7, б с ре-зультатами прямого моделирования пористости (см. рис. 7, а). Для прогнозирования усадочной раковины критерий Ниямы не применим.

**Заключение.** Разработана методика определе-ния критического значения критерия Ниямы на основе результатов компьютерного моделирова-ния литейной технологии в СКМ ЛП "Полигон-Софт".

Получены зависимости пористости от кри-терия Ниямы в отливке "плита" для сплавов 14X17H2Л и МЛ10 при различных условиях ох-лаждения — в кокиле и ХТС.

Определены критические значения критерия Ниямы для сплавов 14X17H2Л и МЛ10, необ-ходимые для прогнозирования зон пористости в отливках, опираясь только на температурные поля в отливке в процессе затвердевания.

Установлено, что критическое значение кри-терия Ниямы для любого сплава зависит от условий его охлаждения и поэтому его необхо-димо определять для каждого технологического процесса.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Method** of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice / E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, S.A. Saito // AFS International Cast Metals Journal. 1982. Vol. 7, No. 3. P. 52—63.
2. **Relationship** Between Niyama Criterion and Radiographic Testing in Steel Casting / R.A. Hardin, S. Ou, K. Carlson, C. Beckermann // AFS Transactions. 2000. Vol. 108. P. 53—62.
3. **Carlson K.D., Ou S., Beckerman C.** Feeding of High-Nickel Alloy Castings // Metallurgical Transactions B. Dec. 2005. Vol. 36B. P. 843—856.
4. **Khaled I.** Prediction of shrinkage porosity in Ti—46Al—8Nb tilt-casting using the Niyama criterion function // International Journal of Metalcasting. 2013. Vol. 7, No. 4. P. 35—41.
5. **MagmaSoft.** URL: <http://www.magmaSoft.com> (дата обращения: 02.09.2021).
6. **Tavakoli R.** On the prediction of shrinkage defects by thermal criterion functions // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. 74. 569—579. DOI: 10.1007/s00170-014-5995-0.
7. **Голенок В.М., Иванина Е.С.** Прогнозирование объемной доли усадочной пористости с использова-нием критерия Ниямы // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. "Студенческая весна: машиностро-ительные технологии". МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. С. 8—12.
8. **Иванина Е.С., Монастырский В.П., Ершов М.Ю.** Количественная оценка образования усадочной пори-стости по критерию Ниямы // Материаловедение. 2021. № 5. С. 19—24.
9. **СКМ ЛП "ПолигонСофт".** URL: <http://www.poligonsoft.ru> (дата обращения: 15.09.2021).
10. **Монастырский В.П., Монастырский А.В., Левитан Е.М.** Разработка технологии литья крупно-габаритных лопаток ГТД для энергетических устано-вок с применением систем "Полигон" и ProCAST // Литейное производство. 2007. № 9. С. 29—34.
11. **Применение** CALS-технологий в литейном про-изводстве ФГУП ММПП "Салют" / В.А. Поклад, О.Г. Оспенникова, С.В. Рудницкий, А.И. Алферов, В.И. Родионов, В.П. Монастырский // Литейное про-изводство. 2007. № 8. 2007. С. 6—9.

*Елена Святославна Иванина;*  
*Валерий Петрович Монастырский, д-р техн. наук,*  
*vpmonastyrskiy@gmail.com*