



УДК 621.74

Поступила 26.07.2013

М. А. ИВАНОВ, В. И. ШВЕЦОВ, Южно-Уральский государственный университет

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ СПЛАВА НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ОТЛИВКАХ

Впервые представлен теоретический механизм расчета напряжений в кристаллизующейся отливке с учетом ее скорости охлаждения. Разработана математическая модель и построен график напряжений при затвердевании стали 30ХНМФЛ.

For the first time the theoretical mechanism of calculation of tension in crystallizing castings taking into account its cooling speed is presented. The mathematical model is developed and the chart of tension while crystallizing of the steel 30HNMFL is built.

Стальные отливки, особенно крупные, часто поражаются трещинами. Сталь имеет худшие литейные свойства, в том числе высокую усадку, которая обуславливает в отливках внутренние напряжения при ее торможении и различия в плотности, а, следовательно, прочности и пластичности при формировании свойств в температурном интервале кристаллизации.

Первые исследования условий образования трещин в России [1] были проведены А. С. Лавровым и Н. В. Калакуцким, а на слитках – П. П. Аносовым, а также Д. К. Черновым, в дальнейшем многие исследователи отечественные и зарубежные уделяли этой проблеме большое внимание. Однако, несмотря на все усилия, до сих пор теорию образования трещин нельзя считать полной.

На практике производственники России продолжали применять наугад испытанные в конкретных условиях технологические приемы, разработанные А. А. Рыжиковым [2], а также данные из монографии П. Ф. Василевского [3], изданной в 1974 г. Однако в последней отсутствуют механизм возникновения и развития напряжений, причины неравномерности деформаций и их критические уровни.

Значительное развитие теоретических основ процесса образования трещин в отливках было представлено в 1979 г. Г. Ф. Баландиным в [4], где изложены итоги исследований, проведенных совместно с Л. П. Каширцевым, реологических свойств литейных, алюминиевых сплавов и на этой основе предложены существенные в теории образования трещин понятия – «запас технологической прочности» и «коэффициент локализации деформации». Однако авторы этих исследований

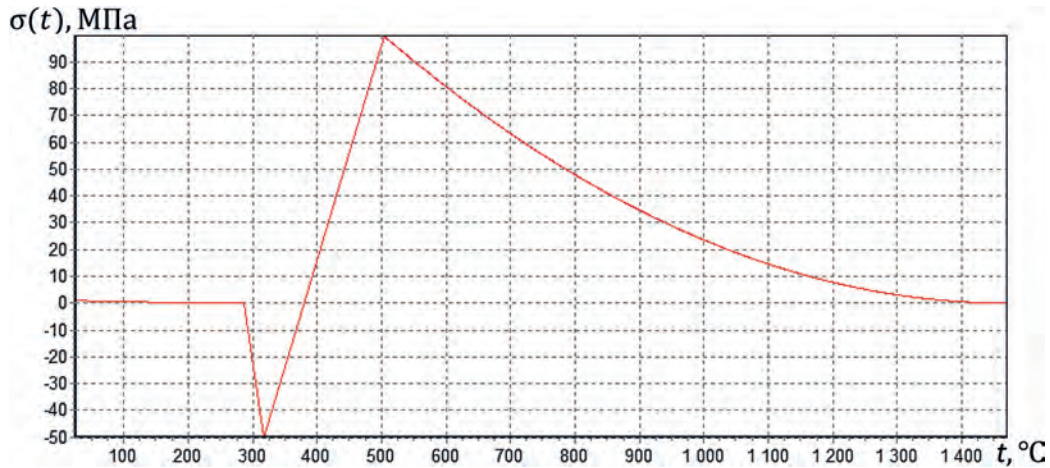
зашли в тупик, очевидно, потому, что все-таки выводы были сделаны на основе полуэмпирических результатов, полученных на сплавах алюминия, которые не являются типичными для изучения этого процесса, так как обладают высокой пластичностью в температурном интервале ниже температуры начала усадки.

Физико-металлургический факультет Южно-Уральского государственного университета (бывшего ЧПИ) занимается этой проблемой со второй половины XX ст. Впервые она была озвучена на первом всесоюзном съезде литейщиков в Минске (Республика Беларусь) в 1978 г. и опубликована в виде тезисов доклада.

Вопросами образования трещин занимались не только литейщики, но и сварщики, где наблюдаются схожие проблемы. Значительный вклад внес сварщик Н. Н. Прохоров [5]. Он установил, что одним из существенных факторов в образовании трещин является темп деформации, но, к сожалению, он не увязал этот фактор со скоростью охлаждения, которая может приводить его к значениям, превышающим деформационную способность сплава, особенно в начальный период формирования отливки, т. е. в интервалах кристаллизации (эффективный интервал кристаллизации и температурный интервал хрупкости).

В 1986 г. вышло учебное пособие [6], в котором на основе многолетних исследований дилатометрических и механических свойств группы специальных марок стали теория образования трещин в стальных отливках получила развитие.

Дальнейшее развитие теоретических исследований авторов привело к пониманию процесса об-



Зависимость напряжений от температуры в жестко закрепленном бруске при кристаллизации стали 30ХНМФЛ, имеющей перлитное расширение

разования трещин в отливках. Результаты представлены в [7].

Для реализации теоретической модели образования трещин в отливках необходимо проведение экспертной оценки полученной модели. Основой теоретического подхода является скорость охлаждения отливки.

Условием образования трещин с позиции статической теории прочности является следующее неравенство:

$$\sigma(t) \geq \sigma^B(t), \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – температурная зависимость временного сопротивления разрыву, МПа; $\sigma^B(t)$ – температурная зависимость предела прочности материала, МПа.

Путем анализа уравнений в [7] получено уравнение, связывающее уровень напряжений в участке отливки со скоростью охлаждения сплава:

$$\sigma(t) = \alpha b K (1 - n) (t_{н.у} - t)^3 \tau^{-1}, \quad (2)$$

где α – коэффициент усадки, $1/^\circ\text{C}$; b – температурный коэффициент модуля упругости, МПа/ $^\circ\text{C}$; K – средний коэффициент пропорциональности, характеризующий релаксационную способность сплава в определенном температурном интервале, $\text{c}/^\circ\text{C}$; n – коэффициент, характеризующий уровень торможения усадки формой или конструкцией отливки, доли ед., при $n = 0$ наблюдается полное торможение усадки; $t_{н.у}$ – температура начала усадки, $^\circ\text{C}$; t – текущая температура, $^\circ\text{C}$; τ – продолжительность охлаждения отливки от температуры начала усадки до текущей температуры, с.

Для проведения расчетов удобно задавать скорость охлаждения напрямую. Так как скорость охлаждения определяется формулой

$$V(t) = (t_{н.у} - t) \tau^{-1}, \quad (3)$$

то выражение (2) с учетом (3) примет вид

$$\sigma(t) = \alpha b K (1 - n) (t_{н.у} - t)^2 V(t). \quad (4)$$

Задавая определенную скорость охлаждения, представляется возможность произвести расчет напряжений при полном торможении усадки ($n = 0$) для стали 30ХНМФЛ, реализующей в процессе кристаллизации перлитное расширение. Для такого превращения процесс охлаждения необходимо разбить на три стадии:

- охлаждение в γ -области от 1470 до 503 $^\circ\text{C}$;
- охлаждение в переходной $\gamma \rightarrow \alpha$ -области от 503 до 317 $^\circ\text{C}$;
- охлаждение в α -области от 317 до 20 $^\circ\text{C}$.

Расчет проводят по областям: сначала в высокотемпературной до температуры начала превращения (1470–503 $^\circ\text{C}$), затем в интервале превращения (503–317 $^\circ\text{C}$) и, наконец, в низкотемпературной области (317–20 $^\circ\text{C}$).

В интервале превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ происходит расширение бруска и, следовательно, уменьшение напряжений. При этом конечное значение напряжений при температуре 317 $^\circ\text{C}$ зависит от величины перлитного расширения и упругой деформации, определяемой по закону Гука:

$$\sigma_{317} = \left(\frac{\sigma_{500}}{E_{500}} - \varepsilon_p \right) E_{500}. \quad (5)$$

Исходные данные для расчета приведены в таблице.

Характеристики стали 30ХНМФЛ (справочные и экспериментальные)

Область	α , $1/^\circ\text{C}$	b , МПа/с	K , $\text{c}/^\circ\text{C}$	$V(t)$, $^\circ\text{C}/\text{c}$	ε_p , %
γ	$2,14 \cdot 10^{-5}$	189,14	0,0643	0,41	–
$\gamma \rightarrow \alpha$	–	–	–	–	0,082
α	$1,16 \cdot 10^{-5}$	57	0,0643	0,27	–

Результаты расчета по выражениям (4), (5) представлены на рисунке.

Как видно из выражения (4), с повышением скорости охлаждения будет расти и уровень напряжений. Значит, существует некий критический уровень, когда с повышением скорости охлаждения напряжения растяжения превысят временное сопротивление разрыву и в теле отливки будет зародиться трещина.

Для практической оценки вероятности образования трещин в отливке необходимо дополнить диаграмму (см. рисунок) данными о прочностных характеристиках сплава в каждой точке температурного интервала. В случае если временное сопротивление разрыву в конкретный временной период при определенной температуре будет меньше, чем напряжения растяжения по графику, то можно ожидать зарождение трещины. Такой механизм будет работать в случае полного торможения усадки.

Для дальнейшего исследования наиболее интересен температурный интервал образования горя-

чих трещин (ЭИК, ТИХ), когда прочность сплава невысока, а растягивающие напряжения вследствие неравномерности затвердевания различных участков отливки могут принимать высокие значения, и экстремум при температуре начала перлитного расширения, когда напряжения растяжения вследствие усадки при полном торможении усадки максимальны.

Таким образом, теоретическим анализом установлено, что на образование трещин в период кристаллизации сплава большое влияние оказывает скорость охлаждения сплава. Выведена математическая модель уровня напряжений в кристаллизующейся отливке с учетом ее скорости охлаждения. Необходимо проведение опытов для установления прочностных характеристик сплава при высоких температурах, вплоть до температуры начала усадки.

Литература

1. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. М.: Металлургиздат, 1948.
2. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. М.; Свердловск: Машгиз [Уралосибирское отделение], 1954.
3. Василевский П. Ф. Технология стального литья / П. Ф. Василевский. М.: Машиностроение, 1974.
4. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Ч. II / Г. Ф. Баландин. М.: Машиностроение, 1979.
5. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке / Н. Н. Прохоров. М.: Металлургия, 1968. Т. 1.
6. Швецов В. И. Производство отливок из стали: Учеб. пособ. / В. И. Швецов, В. М. Александров. Челябинск: ЧПИ, 1986.
7. Развитие теории трещиностойчивости отливок / М. А. Иванов, В. И. Швецов, Е. Л. Волосатова, Д. В. Изотов // Вестн. Южно-Уральск. гос. ун-та. Сер. Металлургия. 2011. Вып. 17. № 36. С. 48–50.