

на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства высокопрочной коррозионностойкой стали с переходным содержанием азота.  
// Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №3. – С. 31-36

2. Коджаспиров Г.Е. Термомеханическая обработка – эффективный способ регулирования структуры и свойства металлических материалов и основа ресурсосберегающих технологий // Тезисы докладов Российской научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие технологии для России». – СПб. – 1995. – С. 23
3. Кончиц В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке // Трение и износ. 1991, т.12, №2. – С. 267-277.

**УДК 539.3**

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА**

**Василевич Ю.В.<sup>1</sup>, Неумержицкая Е.Ю.<sup>2</sup>, Москалев С.А.<sup>3</sup>,  
Братковский К.А.<sup>1</sup>, Лелес Д.<sup>1</sup>**

1) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь;

2) Академия последипломного образования Минск, Республика Беларусь;

3) Конструкторское бюро «Дисплей» Витебск, Республика Беларусь.

Явление ползучести (рост деформации при постоянных напряжениях) повсеместно проявляется при воздействии на детали высоких температур. Принято различать три стадии ползучести:

- неустановившаяся ползучесть с затухающей во времени скоростью;
- установившаяся – с постоянной скоростью;
- ползучесть с быстро нарастающей скоростью, заканчивающаяся разрушением детали.

На рисунке изображена цельнолитая подовая плита из стали 20Х25Н19С2Л (длина 970 мм, ширина 630 мм, толщина 20 мм) с продольной сквозной трещиной, образовавшейся в процессе ее эксплуатации. Плита предназначена для размещения на ней изделий для закалки в термопечи в диапазоне изменения температуры 850°С-1020°С.



Рисунок – Зафиксированная трещина в плите

Для оценки работоспособности таких и подобных им изделий используются методы расчета термочности и при необходимости выполняются экспериментальные исследования по изучению зависимости их механических и физических свойств от температуры и некоторых определяющих факторов, влияющих на прочность и долговечность функционирования в заданных эксплуатационных условиях. К числу таких факторов относятся: время действия и изменения нагрузки, продолжительность термообработки, концентрация напряжений, вид деформаций, геометрия изделий и др.

Анализ результатов экспериментальных исследований [1] микроструктуры материала в зоне разрушения образцов при высоких напряжениях показал, что в них зафиксирована вытянутость зерен, искривление блоков двойникования, вызванных внутризернным скольжением, связанным с большой деформацией ползучести, накапливаемой до разрушения. Неравномерность деформирования различных элементов структуры (зерен, границ зерен, двойников) приводит к возникновению высоких напряжений в макрообъемах металла, особенно в местах стыков зерен, и образованию трещин (клиновидного характера) по границам зерен и двойников [2] предшествующих разрушению образца. Развитие трещин при более низких напряжениях, связано с разупрочнением границ зерен, с появлением на границе макропор, число и размеры которых возрастают по мере движения длительности действия температуры.

Поскольку теория ползучести при сложных напряженных состояниях близка по содержанию положениям теории термопластичности, то методика расчета термочности при высоких температурах для рассматриваемого случая основывается на следующих этапах расчета.

1. Суммарную деформацию материала надо рассматривать состоящую из упругой  $\varepsilon_{ij}^{уп}$ , пластической  $\varepsilon_{ij}^{пл}$ , деформации ползучести  $\varepsilon_{ij}^п$  и температурного расширения  $\delta_{ij}\varepsilon^T$

$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{уп} + \varepsilon_{ij}^{пл} + \varepsilon_{ij}^п + \delta_{ij}\varepsilon^T$ , где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $T$  – температура.

2. Средняя деформация ползучести равна нулю  $\varepsilon^п = 0$  и компоненты деформации ползучести совпадают с компонентами девиатора  $\varepsilon_{ij}^п = e_{ij}^п$ .

Скорости деформаций определим дифференцируя по времени выше приведенные формулы

$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{уп} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{пл} + \dot{\varepsilon}_{ij}^п + \delta_{ij} \dot{\varepsilon}^T$ ;  $v^п = 0$ ;  $v_{ij}^п = \dot{\varepsilon}_{ij}^п$ .

3. Компоненты скорости ползучести  $v_{ij}^п$  пропорциональны девиаторным компонентам напряжений  $\sigma_{ij}$  [1]

$v_{ij}^п = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i} v_i^п$ , где  $v_i^п$  интенсивность скорости деформации ползучести.

Выполненные исследования показали, что установленный эксплуатационный период времени функционирования плиты рекомендуется осуществлять не в одном непрерывном этапе отжига с достижением требуемой температуры нагрева, приводящему к неравномерному распределению температуры по толщине изделия, а принять к исполнению процесс нагрева поэтапный. На каждом этапе нагрев плиты осуществлять до определенной

температуры, затем сделать выдержку этой температуры по времени до достижения на каждом этапе равномерного нагрева плиты по толщине, не превышая  $\sigma_B=500$  МПа и  $\sigma_{02}=250$  МПа [3].

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Демьянушко И.В. и др. Термопрочность деталей машин // М.: Машиностроение. – 1975. – 455 с.
2. Василевич, Ю.В. Выполнение условия равновесия твердого тела с нетонким остаточным клиновидным двойником в случае плоскодеформированного состояния / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Республиканский межведомственный сборник научных трудов «Машиностроение». Минск, вып. 33, 2021, с. 128-134.
3. Марочник сталей и сплавов. Механические свойства стали 20Х25Н19С2Л.

**УДК 621.923.6**

## **АНАЛИЗ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ДИСКОВЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ МЕТОДОМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Ажар А.В., Осадчий Е.Н., Ишкуло П.Ю.**

Белорусский национальный технический университет Минск, Республика Беларусь

Дисковые модульные фрезы – это разновидность фасонных дисковых насадных однониточных фрез. Они применяются для чернового и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, чернового нарезания зубьев косозубых колес, чернового, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Фрезы затылованные, профиль зуба выполнен по эвольвенте. Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, с некоторой погрешностью, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с определенным числом зубьев. Профиль зуба фрезы, входящий в набор, соответствует наименьшему числу зубьев определенного интервала. ГОСТ 10996 — 64 установлено два набора фрез: из 8-ми фрез для нарезания колес с модулем до 8 мм; из 15-ти фрез для колес с модулем свыше 8 мм [1].

Основной способ заточки задней поверхности фасонной фрезы при изготовлении – затылование по кривой в виде спирали Архимеда [2, 3]. Этот метод наиболее простой с точки зрения реализации и имеющегося оборудования. Фрезы перетачиваются при затуплении только по передней поверхности, независимо от вида износа, а затылование по спирали Архимеда позволяет сохранить высоту профиля зуба и обеспечить удовлетворительные задние углы во всех радиальных сечениях зуба на всех конхоидах как у нового, так и восстановленного инструмента. Затылование шлифованием наиболее