

The method of calculation of plastoelastic deformations and stresses of prismatic slugs of rectangular section at their heating in metallurgical furnaces is worked out.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси, В. Е. РОТЕНБЕРГ, ВГТУ,
И. В. ФАЙН, ИТМО НАН Беларуси, М. Л. ГЕРМАН, РУП «БелТЭИ»,
С. М. КАБИШОВ, БНТУ

УДК 621.78.011:539.376

НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ НАГРЕВЕ. Сообщение 2. ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ НА НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАГОТОВОК

Введение. Под воздействием высоких температур в стальных заготовках может возникнуть явление ползучести, связанное с вязкоупругими свойствами. Это явление более сложное по сравнению с явлениями пластичности или упругости, поскольку связано с темпом изменения температуры и, таким образом, непосредственно определяется температурно-временными характеристиками.

Явление ползучести хорошо известно в различных механизмах и конструкциях, подвергаемых длительным высокотемпературным нагрузкам, оно интенсивно изучалось на протяжении прошедшего столетия в связи с многочисленными потребностями машиностроения. Так, например, устойчивость к длительным деформациям, долговечность различных узлов при высокой температуре в значительной степени определяются ползучестью. Это явление может иметь место и при высокотемпературном нагреве под последующую прокатку стальных заготовок. В то же время при расчете напряжений и деформаций, возникающих в заготовках, этим эффектом, как правило, пренебрегают. В настоящей работе рассматривается взаимодействие деформации ползучести с упругими и пластическими деформациями при нагреве заготовки прямоугольного сечения в металлургических печах.

Математическая модель. В общем случае нагружения, т.е. в случае изменения напряжения и температуры от времени, деформация ползучести ϵ_v является функцией времени t , напряжения σ и температуры T : $\epsilon_v = f(t, \sigma, T)$, что обычно представляют в виде

$$\epsilon_v = f_1(t) f_2(\sigma) f_3(T). \quad (1)$$

Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные разными авторами, дают функциональные зависимости различных видов: линейные, полиномиальные, логарифмические, экспоненциальные, смешанные функции от времени; экспоненциальные, степенные гиперболические функции от напряжения.

Зависимость от температуры вводится в соответствии с законом Аррениуса:

$$f_3(T) \sim \exp(-Q/RT), \quad (2)$$

где Q – кажущаяся энергия активации ползучести; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура [1–4].

Ползучесть вызывается двумя основными механизмами – дислокационным и диффузионным [1, 5, 6].

Преобладающая роль дислокационной или диффузионной ползучести в различных случаях показана в работе [2] в виде упрощенной диаграммы механизмов деформации, а в работе [7] приведены соотношения между напряжением растяжения и температурой, где указаны механизмы деформации для алюминия и железа при скорости деформации 10^{-8} с^{-1} и размере зерна 32 мкм.

При гомологических температурах выше 0,4 возникает несколько механизмов ползучести [1, 5, 6], которые связаны с переползанием и аннигиляцией краевых дислокаций, зависящих от диффузии,

происходящей либо в объемах, либо вдоль ядер дислокаций. Механизмы ползучести зависят от уровня гомологической температуры и размеров зерен кристаллических структур, так как при гомологических температурах, больших или равных 0,4, границы зерен представляют плоскости скольжения, которые могут использоваться наряду с плоскостями скольжения внутри зерен [5, 6].

Чтобы на границах зерен не возникали пустоты, проскальзывание должно вызывать деформацию самих зерен, а именно дислокационное скольжение, или же возникает диффузия вакансий, вызывающая диффузионную ползучесть. Диффузионная ползучесть, которая дает вклад в общую деформацию ползучести, осуществляется либо миграцией вакансий в объеме (ползучесть Набарро–Херринга), либо миграцией вакансий по границам зерен (ползучесть Кобле). Различные комбинации этих процессов вызывают микроскопическую деформацию, а образование и рост межкристаллитных пустот могут привести к межкристаллитному разрушению.

Следовательно, деформация ползучести, измеряемая при эксперименте в общем случае теплового нагружения, должна иметь несколько составляющих: деформации, вызываемые консервативным и неконсервативным движением дислокаций, проскальзыванием зерен, направленной диффузией вакансий и ростом (и возникновением) межкристаллитных пустот.

Из теоретических положений следует, что не все перечисленные механизмы ползучести являются взаимно независимыми (как это часто предполагают) [5–7].

Требования надежной оценки работоспособности конструкций, работающих при высокой температуре, вызвали необходимость проведения экспериментальных, феноменологических и физических исследований в области пластичности и ползучести, которые активно проводились во второй половине XX века.

Из большого количества публикаций отметим монографии [6, 8]. В работе [6] подробно рассматриваются разные механизмы ползучести кристаллических тел. Ряд экспериментальных исследований может служить частью общей концепции, на основе которой исследованы принципы поведения твердых тел при высокотемпературном нагружении. Авторы [8], основываясь на работах, проведенных в Гарвардском и Кембриджском университетах, обобщили и классифицировали большое количество экспериментальных данных на базе существующих теоретических представлений. Метод, использованный авторами, позволил выявить аналогии и различие в поведении групп материалов и классифицировать их по общим признакам. Так как сравнение деформаций разных материалов может давать достоверные результаты только на основе приведенных к одному масштабу фундаментальных переменных, которые позволяют описать процесс деформации, авторами [8] были выбраны очевидные и чаще всего используемые температуры и один из модулей упругости.

Этот выбор нормирующих параметров является наиболее часто используемым, но не единственно возможным и не всегда лучшим; еще можно было использовать энергию, отнесенную к молярному объему, энергию, деленную на постоянную Больцмана и другие параметры [1].

При построении карт деформации использовали уравнения, вид которых позволяет определить теория, однако для установления значений постоянных, входящих в эти уравнения, необходимы экспериментальные данные. Явление ползучести слишком сложное, чтобы можно было предложить точную модель кинетического процесса. Поэтому и приходится пользоваться феноменологической приближенной моделью [1, 5–8]. Но этот подход, базирующийся на физической модели, отмечают авторы [8], дает возможность экстраполировать результаты исследования в область, где эксперименты вообще отсутствуют.

Макроскопическими переменными ползучести являются напряжение, скорость деформации, деформация, температура и время. Но при ползучести может изменяться структура твердого тела – плотность дислокаций и характер их распределения, размеры ячеек, зерна, выделений и расстояние между ними, т.е. могут изменяться параметры состояния тела.

После неустановившейся стадии ползучести (в ходе которой меняются параметры состояния) возникает установившаяся стадия, в течение которой твердое тело деформируется без изменения параметров состояния.

Кроме того, есть группа величин, влияющих на процесс ползучести, такие, как атомный объем, период решетки, энергия связи, модули упругости, коэффициенты диффузии и т.п. Эти величины можно считать постоянными.

При составлении карт деформации в [8] использовались два приближения. Первое заключалось в том, что структура твердого тела не изменяется, т.е. параметры состояния остаются постоянными. Тогда скоростная зависимость деформации полностью описывает процесс ползучести. Второе приближение заключается в рассмотрении деформации ползучести только на установившейся стадии, пренебрегая деформационным упрочнением и неустановившейся стадией. Кроме того, составленные карты не учитывают очень высокие или очень низкие скорости деформации. Это объясняется недостаточным количеством имеющихся данных в этих областях.

Авторы [8] отмечают, что приведенные уравнения и построенные на их основе карты механизмов деформации следует рассматривать лишь как первое приближение.

Точность для величины предела текучести при заданных температуре, скорости ползучести и степени деформационного упрочнения составляла $\pm 10\%$, как и при проведении обычных экспериментов. Но при заданных температуре и напряжении «скорости деформации получали вдвое отличающиеся значения (очевидно от результатов эксперимента). По этой причине авторы учитывали температурные зависимости модуля упругости, однако пренебрегали аналогичными зависимостями для атомного объема и вектора Бюргерса».

Работа, проведенная авторами [8], позволила построить карты механизмов деформации более 40 металлов, сплавов и керамик. Вместе с тем следует отметить, что среди рассмотренных сплавов нет ни одной углеродистой стали. Поэтому рассмотрение углеродистых сталей, возможно лишь весьма приближенно, по рекомендации авторов [8], используя параметры решетки, модули и коэффициенты диффузии для основы сплава, т.е. железа. Если требуется более высокая степень точности, то необходимы экспериментально полученные данные.

На основании изложенного выше для исследования ползучести углеродистой стали при нагреве заготовки были взяты данные для чистого железа [8].

Скорость ползучести при нагреве заготовки определяется по уравнению Дорна [1, 6, 8], которое использовалось разными авторами [6, 8] для построения деформационных карт:

$$\dot{\varepsilon}_V = A \frac{D\mu b}{kT} \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^n, \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_V$ – скорость деформации удлинения; A – безразмерная постоянная; $D(T)$ – коэффициент самодиффузии; μ – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; σ – нормальное напряжение; n – показатель степени; A и n зависят от структуры материала и механизма ползучести.

Уравнение (3) используется для расчета ползучести чистых металлов и твердых растворов и описывает процесс высокотемпературной ползучести, которая подчиняется степенному закону и определяется разными механизмами ползучести [6, 8]. Анализ многочисленных экспериментов показывает, что для разных материалов величины A и n нельзя считать независимыми. В этом случае уравнение Дорна превращается в уравнение Нортон [2, 3], а зависимость между величинами A и n определяется эмпирическим уравнением [1, 6].

Используя принцип аддитивности, дополним компоненты упругопластических деформаций компонентами деформаций ползучести $\dot{\varepsilon}_V$. Тогда, используя гипотезу плоских сечений, уравнения Дюамеля–Неймана и закон Гука, получаем:

$$\sigma = \sigma_{zz} = E(\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_V - \alpha T) = E(A_x y + A_y x + A_0 - \varepsilon_p - \varepsilon_V \alpha T), \quad (4)$$

где z – продольная ось заготовки; E – модуль упругости первого рода; A_x , A_y – кривизны проекций изогнутой оси заготовки на координатные плоскости, образованные естественными осями координат заготовки; A_0 – перемещение центра тяжести поперечного сечения заготовки; ε_p – деформация пластичности; α – коэффициент линейного температурного расширения; T – изменение температуры от начальной температуры T_0 .

$$\text{Если } \alpha = \alpha(T), \text{ то } \alpha T = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT.$$

Выразив внутренние силовые факторы заготовки через напряжения и использовав уравнения равновесия заготовки, которая свободна от внешних сил, и подставив в уравнения равновесия (4), получим систему трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A_0 \int Ed\Omega + A_x \int Eyd\Omega + A_y \int Exd\Omega &= \int E\alpha T d\Omega + \int E\varepsilon_p d\Omega + \int E\varepsilon_V d\Omega, \\ A_0 \int Eyd\Omega + A_x \int Ey^2 d\Omega + A_y \int Exyd\Omega &= \int E\alpha T y d\Omega + \int E\varepsilon_p y d\Omega + \int E\varepsilon_V y d\Omega, \\ A_0 \int Exd\Omega + A_x \int Exyd\Omega + A_y \int Ex^2 d\Omega &= \int E\alpha T x d\Omega + \int E\varepsilon_p x d\Omega + \int E\varepsilon_V x d\Omega. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Интегралы берутся по всей площади поперечного сечения заготовки.

В общем случае нагружения, когда появляются и пластические деформации, и деформации ползучести, а влиянием температуры на изменения физико-механических характеристик пренебречь

нельзя, силовую деформацию можно найти после определения коэффициентов A_0 , A_x и A_y из решения системы (5) и уравнения (3).

По сравнению с решением задачи упругопластичности появление деформации ползучести усложняет решение задачи вязкоупругопластичности, так как затрудняет линейризацию уравнений (или делает ее вообще невозможной) даже при использовании деформационной теории пластичности.

Кроме того, в задачах вязкоупругопластичности появляется еще одна переменная – время, которое в задачах определения термоупругопластических деформаций является лишь параметром, влияющим на температурное поле. В случае ползучести, которая на каждом временном шаге определяется при постоянном напряжении и постоянной температуре, иногда целесообразно вводить новый параметр, позволяющий скорректировать изменение температуры во времени [7]. Сложность решения задачи состоит в том, что ползучесть не является элементарным процессом, определяемым единственным механизмом деформации, поэтому трудно найти истинную энергию активации процесса. Экспериментально можно определить кажущиеся величины энергии активации и, чтобы уменьшить неизбежные погрешности определения энергии активации, вводят корректирующий фактор.

Проведенный анализ и опыт решения термоупругопластической задачи приводят к выводу о том, что для решения системы уравнений (5) целесообразно использовать итерационный градиентный метод (метод наискорейшего спуска).

Найдем коэффициенты уравнения Дорна (3), используя табл. 6 из работы [8] и справочник [9]. Коэффициент самодиффузии $D(T)$ зависит от температуры по экспоненциальному закону [8]:

$$D(T) = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (6)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель; Q – энергия активации; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – газовая постоянная. Для γ -железа (размером зерна 0,1 мкм [8]) вектор Бюргерса $b = 2,48 \cdot 10^{-10}$ м, предэкспоненциальный множитель $D_0 = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с, энергия активации $Q = 270$ кДж/моль, показатель $n = 4,5$, безразмерная постоянная $A = 4,3 \cdot 10^5$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Результаты численного расчета. Рассмотрим нагрев заготовки из стали 35 квадратного сечения 0,1×0,1м при симметричном нагреве. Нагрев будем считать квазистационарным, при этом температурное поле определяется профилем параболоида, параметры которого зависят от коэффициента теплопроводности металла и величины теплового потока на границе. Для упрощения анализа эти параметры предполагались фиксированными.

Предполагается, что деформация ползучести не зависит от накопленной пластической деформации и определяется, согласно (3), (6), только величиной напряжений и температурой.

Деформации и напряжения вычисляли по программе расчета деформаций и напряжений с учетом зависимости механических свойств от температуры при нагреве заготовок с использованием гипотезы плоских сечений.

Результаты расчетов напряжений при симметричном нагреве без учета и с учетом ползучести (формулы (3), (6)) приведены на рис. 1, I, II. Для теплового потока, равного 100 кВт/м², практически до 10-й минуты нагрева (средняя температура около 630 °С) ползучесть не оказывает существенного влияния на величину напряжений, а затем довольно быстро снижает их, так что к концу нагрева (температура около 1000 °С) напряжения становятся незначительными и практически не отличаются от напряжений, возникающих при вдвое меньшей скорости нагрева.

Характер влияния эффекта ползучести на температурные напряжения показан на рис. 2, а.

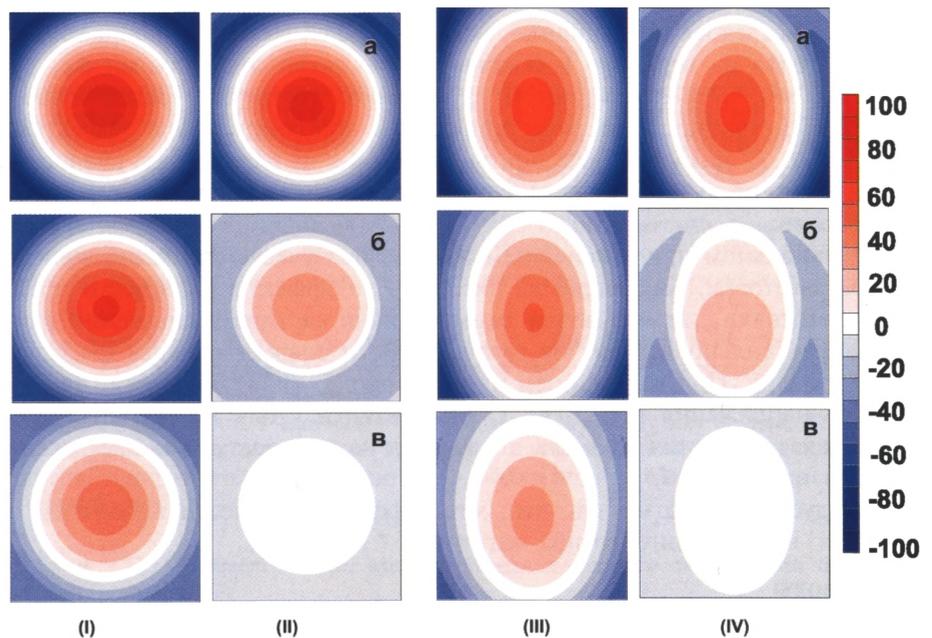


Рис. 1. Поля осевых напряжений при симметричном нагреве заготовки без учета (I) и с учетом (II) ползучести при временах $t = 10$ мин (а), $t = 12,5$ мин (б) и $t = 15$ мин (в), прошедших с начала нагрева и несимметричном нагреве без учета (III) и с учетом (IV) ползучести при временах $t = 13$ мин (а), $t = 16,5$ мин (б) и $t = 20$ мин (в), прошедших с начала нагрева (тепловой поток 100 кВт/м²)

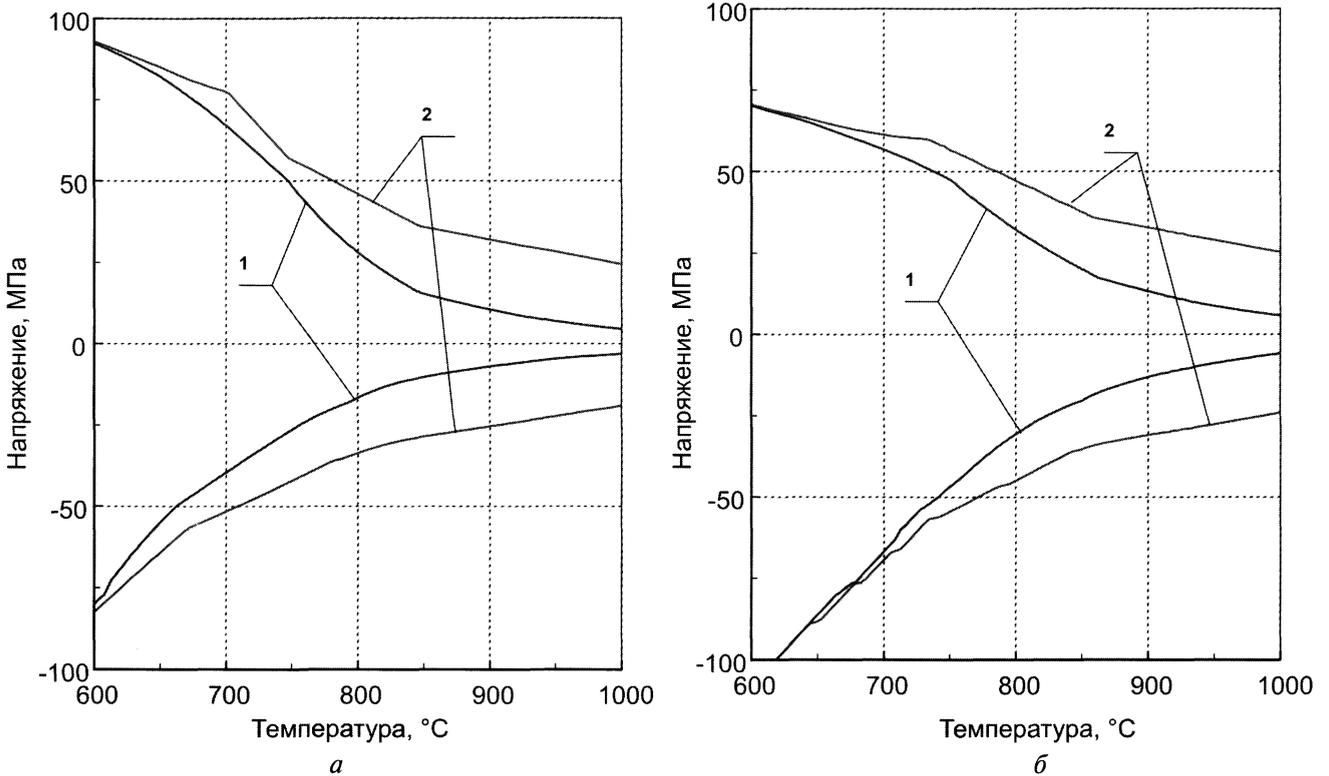


Рис. 2. Зависимость максимальных и минимальных осевых напряжений от температуры в заготовке при симметричном нагреве (а) и несимметричном нагреве (б) с учетом ползучести (1) и без учета ползучести (2) (тепловой поток 100 кВт/м²)

Таким образом, эффектом ползучести при нагреве до температур 600 °С можно пренебречь, хотя при дальнейшем нагреве этот эффект оказывается весьма значительным: при температуре 1000 °С напряжения уменьшаются в 3–8 раз, при этом эффекты ползучести при более быстром нагреве оказываются в целом сильнее, что, на первый взгляд, кажется парадоксальным. На самом деле, более быстрый нагрев приводит к увеличению напряжений и вследствие сильно нелинейной зависимости скорости ползучести от напряжений перевешивает эффект от собственно уменьшения времени нагрева. При очень медленном нагреве напряжения будут незначительными и эффект ползучести пренебрежимо мал.

При исследовании влияния эффекта ползучести на напряжения при несимметричном нагреве потоки тепла на верхнюю и боковые грани полагались такими же, как и при симметричном нагреве (100 кВт/м²), а тепловой поток на нижнюю грань был равен нулю.

Несимметричность нагрева приводит к дополнительным эффектам, связанным с ползучестью. На рис. 1, III, IV показаны результаты расчетов при параметрах, аналогичных симметричному случаю. Из рисунка видно, что и в этом случае при температурах ниже 600 °С эффектами ползучести можно пренебречь.

Однако затем при дальнейшем нагреве ползучесть оказывает существенное влияние на напряжения внутри заготовки. Как видно из рис. 1, IV, б эффекты ползучести прежде всего сказываются в верхней части заготовки, так что почти симметричная картина напряжений нарушается. Это связано с тем, что ползучесть сильно зависит от температуры и эффект сильнее сказывается в более прогретой верхней части изделия. При дальнейшем нагреве (рис. 1, IV, в) ползучесть захватывает и нижнюю часть изделия, так что напряжения при 1000 °С оказываются столь же низкими, как и для симметричного случая.

Характер влияния эффекта ползучести на температурные напряжения при несимметричном нагреве показан на рис. 2, б.

Следует также отметить, что, хотя эффект ползучести необратим, он не оказывает существенного влияния на величину изгиба заготовки.

Выводы

В рамках несвязанной квазистатической задачи термоупругости разработан метод расчета вязкоупругопластических деформаций и напряжений в призматических заготовках прямоугольного сечения при их нагреве в металлургических печах. Приведены примеры полученных численных решений для симметричного и несимметричного нагрева заготовок из углеродистой стали.

При температурах ниже 600 °С эффект ползучести практически не влияет на изменение температурных напряжений в нагреваемых заготовках, поэтому данным явлением при расчетах напряженно-деформированного состояния можно пренебречь, в то же время при температурах выше 1000 °С эффект ползучести очень сильно снижает напряжения, при этом величина уменьшения напряжений зависит от самой величины напряжений.

Литература

1. Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах / Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
2. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести / Пер. с англ. М.: Мир, 1986.
3. Кеннеди А. Дж. Ползучесть и усталость в металлах / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1965.
4. Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1968.
5. Пуарье Ж. П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел / Пер. с франц. М.: Металлургия, 1982.
6. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов / Пер. с чешск. М.: Мир, 1987.
7. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов / Пер. с японск. М.: Металлургия, 1986.
8. Фрост Г. Дж., Эшби М. Ф. Карты механизмов деформации / Пер. с англ. Челябинск: Металлургия, 1989.
9. Богуславский М. Г., Широков К. П. Международная система единиц SI. Изд. второе, исправл. и доп. М.: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968.



КОНФЕРЕНЦИИ ВЫСТАВКИ

31.01–02.02

8-я межрегиональная специализированная выставка. Место проведения: г. Воронеж, Дворец Творчества Детей и Молодежи (пл. Детей, 1). Сайт выставки: <http://prom.veta.ru/news/?exroid=108> E-mail: mach@veta.ru
Тел/Факс: +7 (4732) 51-20-12, 77-48-36

Тематика: Металлургия | Оборудование. Станки | Комплектуемые изделия. Оснастка | Инструмент | Приборы. Электронные компоненты и материалы | Промышленная автоматизация | Внутрипроизводственная логистика. Склад | Промышленная безопасность | Экология в промышленности | Управление и финансы | Модернизация. Реконструкции | Антикоррозийные технологии | Профессиональная одежда | Отраслевая литература, СМИ | Учебные и научные учреждения | Малый бизнес.

02.02–04.02

55-й Индийский Конгресс по литейному производству. Место проведения: Агра.

14.02–16.02

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА. МЕТАЛЛУРГИЯ-2007. Пятая международная специализированная выставка продукции машиностроения, приборостроения, технологий, инструментов, оборудования металлообрабатывающего производства. Металлопродукция. Сварка, сварочное оборудование. Место проведения: г.Набережные Челны, пр. Автозаводский 1, блок 21 (ЕХРОКАМА). Тел: (8552) 34-67-53, 35-92-43, 35-90-44, 35-92-49.

13.03–17.03

Петербургская техническая ярмарка – многопрофильное межотраслевое мероприятие, в рамках которого будут работать 10 международных специализированных выставок: МЕТАЛЛУРГИЯ, ЛИТЕЙНОЕ ДЕЛО, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ, ПРИВЭКС, КОМПРЕССОРЫ. НАСОСЫ. АРМАТУРА, ПОДШИПНИКИ, АСУ ЭКСПО, ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЛОГИСТИКА. СКЛАД, СУБКОНТРАКТИНГ СЕВЕРО-ЗАПАД, Бизнес-центр, Биржа деловых контактов и Петербургский промышленный конгресс. Цель мероприятия заключается в стимулировании развития научно-промышленного рынка Северо-Западного региона России, г. Санкт-Петербург (Россия), Выставочный комплекс ЛЕНЭК-СПО в Гавани, павильоны №7, 5. Организатор - Выставочное объединение "РЕСТЭК", Телефон: +7 (812) 320-80-92. E-mail: scipr@restec.ru. Полная информация по мероприятиям в рамках ярмарки, на сайте -<http://www.ptfair.ru>.

07.05–10.05

AISTech 2007. Конференция и выставка технологий черной металлургии. США, Проводится в центре Indianapolis Convention Center. Представляет технологии и последние разработки со всего мира, что позволяет производителям чугуна и стали быть в курсе всех рыночных тенденций в глобальном масштабе. Все доклады и материалы конференции AISTech в обязательном порядке рассматриваются для публикации в ежемесячном отраслевом журнале Iron & Steel Technology, который распространяется среди 10000 подписчиков по всему миру. Программа конференции и экспозиции выставки отражают последние тенденции и достижения в чугунолитейной, сталелитейной, обрабатывающей отраслях, а также самый широкий спектр оборудования и технологий отрасли.

12.06–16.06

GIFA. International Foundry Trade Fair with WFO Technical Forum. Международная ярмарка и технический форум по литейной промышленности. Дюссельдорф (Германия), Тематика: Электротехника, электроника | Приборы, сенсоры, датчики | Обработка поверхности материалов | Металлургия | Металлообработка, сварка, резка.

31.10–02.11

Металлургия. Машиностроение-2007. 6-я Специализированная выставка-конференция. Екатеринбург, Центр Международной Торговли, ул. Куйбышева, 44. Организатор: Уралэкспоцентр.