

УДК 621.983.044:669.715.001

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ. Часть II*

© **Чумаченко Евгений Николаевич**¹, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН,

e-mail: mmkaf@miem.edu.ru;

Портной Владимир Кимович², д-р техн. наук, проф.,

e-mail: portnoy@misis.ru;

Логашина Ирина Валентиновна¹, канд. техн. наук,

e-mail: ilogashina@hse.ru

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Россия, Москва² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

Статья поступила 13.03.2014 г.

Приведены различные методики испытаний для определения механических свойств материалов в состоянии сверхпластичности. Напряжение течения зависит от степени и скорости деформации, структурного параметра и температуры. Обсуждаются реология и механика сверхпластической деформации. Методика была опробована и дала хорошие результаты при испытании сплавов титана и построении математических моделей по заказу компании EADS (Airbus). Данные о методике проведения испытаний и последующей аппроксимации механических свойств представляют большой интерес для построения адекватных прогнозов формоизменения материалов при обработке давлением.

Ключевые слова: механические свойства материалов; сверхпластичность; моделирование; механические испытания.

Проведение испытаний и принципы расчета параметров

Испытания со ступенчатым изменением скорости. При испытаниях на растяжение образец растягивается со скоростью $v_0 = 1-5$ мм/мин до начала устойчивого пластического течения, затем устанавливается минимальная скорость деформирования, по достижении деформации 2–3% скорость деформирования ступенчато увеличивается в 1,5–2 раза. В некоторых случаях более корректны испытания, когда скорость деформирования ступенчато уменьшается. Такие испытания целесообразно использовать для оценки сверхпластичности материалов, в которых структурные изменения (формирование зернистой структуры после обработки давлением и/или рост зерна, например) в начальный период испытания при деформации с малыми скоростями обуславливают сильное деформационное упрочнение или разупрочнение. Испытания таких материалов со ступенчатым увеличением скорости деформирования могут давать завышенные значения показателя скоростной чувствительности m при низких скоростях деформации. К материалам такого типа относятся двухфазные титановые сплавы. В результате испытаний получен массив данных с величи-

нами усилий и длин образца, соответствующих устойчивому течению при каждом значении скорости траверсы. Основные характеристики, рассчитываемые по данным этого массива, – истинное напряжение течения σ и скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определяются по формулам

$$\sigma = P_i L_i / W, \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = v_i / L_i, \quad (2)$$

где W – объем рабочей части образца, мм³; v_i – скорость деформирования, мм/мин; P_i – усилие деформирования, Н; L_i – текущая длина образца, мм.

При растяжении L_i определяется как

$$L_i = L_0 + D_i - \frac{P_i}{K_{s-m}},$$

$$L_i = L_0 + D_i - P_i / K_{s-m}, \quad (3)$$

где L_0 – начальная длина образца, мм; K_{s-m} – жесткость системы образец – машина, Н/мм; D_i – перемещение траверсы (мм), вычисляемое по формуле

$$D_i = v_i \cdot \tau_i, \quad (4)$$

а τ_i – время действия i -той скорости, с.

Жесткость системы образец–машина K_{s-m} определяется по наклону кривой зависимости: усилие – ход на линейном участке нагружения со скоростью v_0 . Устойчивым течением при конкретной скорости траверсы принимается момент деформации, когда быстрый рост (или падение) нагрузки прекращается, и усилие либо остается стабильным, либо начинает медленно снижаться из-за уменьшения поперечного сечения образца. В массив заносят значения усилия и длины образца при конкретной скорости траверсы непосредственно перед переключением на следующую v_{i+1} скорость растяжения.

Испытания с постоянной скоростью деформации. При испытаниях с постоянной скоростью растяжения скорость

*Часть I – см. *Металлург.* 2014. № 12. С. 68–71.

деформации $\dot{\epsilon}$, являющаяся одной из главных характеристик сверхпластичности, непрерывно понижается по мере увеличения длины образца в соответствии с выражением (2). В связи с этим для анализа пластичности материала и процессов упрочнения – разупрочнения более корректны испытания с постоянной скоростью деформации. Такие режимы легко осуществить при наличии системы компьютерного управления испытательной машиной. Если выбрано некоторое значение скорости деформации $\dot{\epsilon}$, то начальная скорость траверсы v_0 , соответствующая начальной длине образца L_0 , также определена. По мере растяжения образца скорость деформации понижается, а ее реальное значение вычисляется по формулам (2)–(4). Для поддержания постоянной скорости деформации скорость перемещения траверсы корректируется. Этот процесс повторяется до достижения заданного удлинения образца или до его разрыва. Шаг изменения скоростей траверсы должен обеспечивать поддержание средней заданной скорости деформации с точностью не менее $\pm(0,3-1)\%$. В результате испытаний с постоянной скоростью деформации по имеющимся в массиве значениям силы и длины образца вычисляют напряжения течения σ (формула (1)) и истинную деформацию

$$\epsilon = \ln(L_i/L_0). \tag{5}$$

Затем строят зависимость коэффициента деформационного упрочнения γ от степени деформации для анализа процессов упрочнения. Коэффициент деформационного упрочнения рассчитывают по формуле

$$\gamma = d \ln \sigma / d \epsilon. \tag{6}$$

Метод испытаний на релаксацию нагрузки позволяет строить зависимости напряжения течения и показателя m от скорости деформации при малых значениях дополнительной деформации (1–5%) по сравнению с построением таких кривых методом скачкового (ступенчатого) изменения скорости растяжения. В последнем случае накапливаемая деформация достигает 40–70%, при которой возможны изменения структуры материала. Таким образом, полученные методом релаксации нагрузки могут служить основой для суждения о структурном состоянии и/или изменениях деформированного состояния материала при растяжении. По этой же причине перспективно проведение испытаний с постоянной оптимальной для данной температуры скоростью деформации до заданных удлинений с последующим испытанием на релаксацию нагрузки, что позволяет собрать мас-

сив реологических характеристик материала для прогнозирования режимов сверхпластичной формовки (СПФ).

Для реализации этой задачи образец растягивается с постоянной скоростью деформации до заданного значения удлинения, затем разгружается до нулевого усилия, после чего вновь нагружается с повышенной скоростью, заведомо соответствующей верхней границе скоростного интервала сверхпластичности. По достижении устойчивого течения при деформации 1–5% траверсы останавливают и регистрируют снижение усилия в системе образец–машина (отслеживая процесс релаксации). В период нагружения образца с повышенной скоростью к моменту остановки траверсы полная деформация D_0 складывается из упругой деформации системы образец–машина D_e и пластической деформации образца D : $D_0 = D_e + D$. Эта полная деформация остается постоянной во времени, а упругая деформация системы образец–машина переходит в пластическую деформацию образца, поэтому

$$\dot{D}_e + \dot{D} = 0. \tag{7}$$

отсюда скорость пластической деформации образца в процессе релаксации

$$\dot{D} = -\dot{D}_e = -\dot{P}/K_{s-m}, \tag{8}$$

где \dot{P} – скорость падения усилия на образце во время релаксации.

Полагая, что жесткость системы образец–машина K_{s-m} и объем рабочей части образца W постоянны во время испытания, можно рассчитать длину рабочей части образца в каждой точке кривой релаксации по формуле

$$L_i = L_{i+1} - (P_i - P_{i+1})/K_{s-m}. \tag{9}$$

Скорость деформации образца при этом

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{D}_i/L_i = -\dot{P}_i/(K_{s-m}L_i), \tag{10}$$

а напряжение течения в каждой точке кривой релаксации

$$\sigma_i = P_i L_i / W. \tag{11}$$

Поскольку после окончания испытания на релаксацию образец извлекается из захватов и длину его рабочей части можно измерить точно, расчет длины образца, скоростей деформации и напряжений (формулы (9)–(11)) ведется в обратном направлении записи последовательности, т.е. от конечной точки кривой релаксации к ее началу. Это позволяет избежать неточностей при определении длины образца, обычно вызы-

ваемых реверсированием направления движения траверсы во время испытаний. Коэффициент жесткости системы образец–машина K_{s-m} рассчитывается, как и в других испытаниях, по наклону линейного участка зависимости усилие–ход на стадии нагружения перед остановкой траверсы.

Математическая обработка данных, полученных в испытаниях разных видов, включает вычисление ряда параметров, являющихся производными. Такими параметрами являются показатель m , определяемый по результатам испытаний со ступенчатым изменением скорости растяжения или по результатам испытаний с релаксацией нагрузки. В последнем виде испытаний скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определяется по скорости падения нагрузки \dot{P} в процессе релаксации. При испытаниях с постоянной скоростью деформации коэффициент деформационного упрочнения γ также является производной логарифма напряжения по деформации. Во всех этих случаях используются сглаживающие сплайн-функции [1], а затем проводится дифференцирование.

Результаты испытаний представляются в виде таблиц и графиков зависимости напряжения течения и показателя m от скорости деформации при разных температуре и степенях деформации. Строятся зависимости относительного удлинения от температуры при оптимальных скоростях деформации. По графикам определяется температурный и скоростной интервалы проявления сверхпластичности (область скоростей деформации и температуры испытания, в которой $m > 0,3$, и относительное удлинение $>200\%$).

Структурный анализ исследуемого материала проводится после отжига, соответствующего времени нагрева образцов до соответствующей температуры испытания. Полученные параметры структуры в этом случае рассматриваются как характеристики исходного состояния сплава.

Для образцов, испытанных с постоянной скоростью деформации до заданных степеней деформации, выполняется количественный анализ структуры. Определяется средний размер частиц α - и β -фаз и λ -объемное содержание β -фазы. Точность определения параметров структуры должна быть не ниже 5% при доверительной вероятности 0,95.

Реологические и механические закономерности сверхпластической деформации

По мере обобщения экспериментальных данных о закономерностях деформации металлов

и сплавов в состоянии сверхпластичности появилась возможность перейти от качественного обсуждения физических аспектов сверхпластичности к количественному описанию процессов сверхпластической деформации (СПД). Это способствует не только более рациональному использованию эффекта в технологических процессах, но и расширяет общие представления о поведении вязкопластических сред.

В реологическом отношении сверхпластическое поведение металлов и других материалов, а также преимущества практического использования сверхпластической деформации (малые напряжения течения, исключительно высокая пластичность и формруемость) можно легко объяснить способностью соответствующих материалов к вязкому течению. Все ранее и недавно разработанные физические и реологические модели СПД базируются на зависимости напряжения от скорости деформации [2–6], которая, как известно, является принципиальной характеристикой вязких материалов. Уровень сверхпластичности количественно оценивается показателем чувствительности напряжения течения к скорости деформации m в уравнении

$$\sigma_u = K \dot{\epsilon}_u^m, \quad (12)$$

где σ_u – интенсивность напряжения течения; $\dot{\epsilon}_u$ – интенсивность скоростей деформации; K – коэффициент пропорциональности.

Простой анализ показывает [7], чем выше показатель скоростной чувствительности напряжения течения, тем сильнее проявляются отмеченные выше преимущества СПД. Для обычных металлов и сплавов при горячей деформации показатель $m < 0,2$, в то время как для сверхпластичных материалов в оптимальных условиях $m > 0,3$. Некоторые материалы ведут себя как линейно вязкие (ньютоновские) жидкости, при этом $m = 1,0$. Коэффициент K является структурно чувствительным и термоактивируемым параметром, связанным со сдвиговой вязкостью материала следующим уравнением:

$$\mu_v = \sigma_u / 3\dot{\epsilon}_u = K\dot{\epsilon}_u^{m-1}/3. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что сдвиговая вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации, если испытываемый материал демонстрирует нелинейную вязкость ($m < 1$), и становится независимой от скорости деформации, если материал ведет себя как линейно вязкая жидкость ($m = 1$).

Ранние модели СПД основывались на представлениях об одном определяющем механизме деформации и описывали сверхпластическое

течение при одноосном растяжении, исходя из традиционных представлений о высокотемпературной ползучести как течения нелинейно вязкой жидкости

$$\sigma_u = K \dot{\epsilon}_u^m, \text{ или } \dot{\epsilon}_u = C \sigma_u^n \quad (14)$$

где $n = 1/m$, K и C – коэффициенты, зависящие от структурного состояния материала, температуры и механизма деформации. Уравнение (12) может с известной точностью и в определенном узком диапазоне скоростей деформации описывать S-образную кривую сверхпластичности $\sigma_u = \sigma_u(\dot{\epsilon}_u)$ или обратную ей кривую $\dot{\epsilon}_u = \dot{\epsilon}_u(\sigma_u)$. Выбор функции в данном случае зависит от вида испытаний материала. Однако при этом показатель скоростного упрочнения m существенно изменяется в зависимости от скорости деформации $\dot{\epsilon}_u$. Это представляет серьезное неудобство при математическом моделировании процессов СПД, в частности, процессов объемной и листовой формовки, отличающихся нестационарностью и большой неравномерностью скоростей деформации по объему заготовки.

Для устранения этого недостатка О.М.Смирновым была предложена реологическая модель упруго-вязко-пластической (EVP) среды, которая описывает реологические параметры сверхпластичных материалов в широком диапазоне скоростей деформации [3]. Модель EVP-среды эффективно используется при решении научных и технологических задач ОМД в состоянии сверхпластичности. Одним из вариантов упрощения этой модели является модель SP-среды, в которой набор упруговязких элементов заменяется элементом с нелинейной вязкостью [8]. Схемы моделей этой среды представлены на рис. 1.

Уравнение связи напряжения течения и скорости деформации при одноосном растяжении, соответствующее этой модели, имеет вид

$$\sigma_u = \sigma_s \frac{\sigma_0 + k_v \dot{\epsilon}_u^{m_v}}{\sigma_s + k_v \dot{\epsilon}_u^{m_v}},$$

или

$$\dot{\epsilon}_u = \left(\frac{\sigma_s}{k_v} \cdot \frac{\sigma_u - \sigma_0}{\sigma_s - \sigma_u} \right)^{1/m_v}, \quad (15)$$

где $\dot{\epsilon}_u$ – значения интенсивностей скоростей деформации; σ_u – напряжения при одноосном растяжении; σ_0 – пороговое напряжение, соответствующее скоростям деформации, близким к нулю; σ_s – предел текучести при больших скоростях деформации; k_v и m_v – параметры нелинейно-вязкого элемента SP-среды (рис. 2).

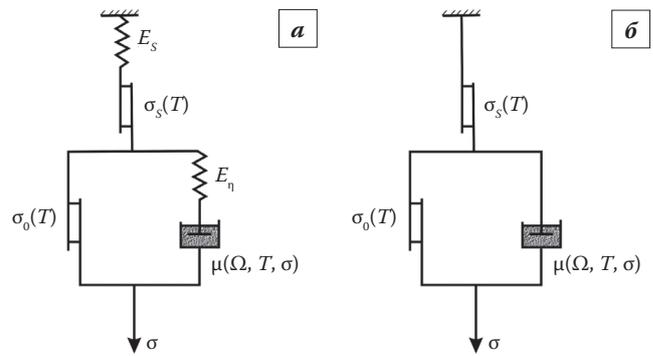


Рис. 1. Варианты SP-среды с учетом упругой деформации (а) и без нее (б)

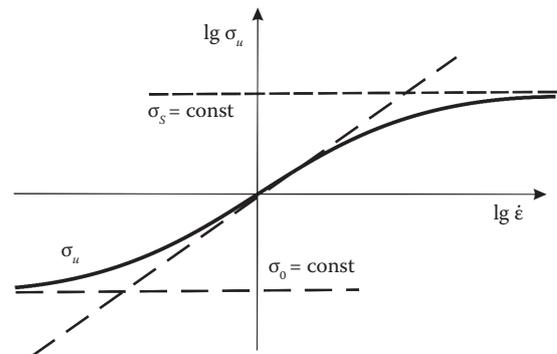


Рис. 2. Зависимость напряжения течения SP-среды от скорости деформации

Достоинством реологической модели SP-среды является инвариантность ее коэффициентов σ_0 , σ_s , k_v и m_v относительно изменения скорости деформации в широком скоростном интервале.

Модель (15) хорошо описывает ультрамелкозернистые сплавы (УМЗСП). Тем не менее в отношении УМЗСП остается ряд вопросов, вызывающих дискуссии, касающиеся природы этого состояния. Среди них есть и вопросы, создающие трудности при использовании рассмотренной выше модели для компьютерного моделирования процессов СПФ. Они связаны с выяснением природы и оценкой значений основных реологических параметров модели, а именно порогового напряжения σ_0 , показателя скоростной чувствительности m_v и предела текучести σ_s . Точность определения значений этих параметров существенно влияет на точность описания экспериментальных данных с помощью расчетных кривых $\sigma_u(\dot{\epsilon}_u)$.

Дальнейшее развитие модели SP-среды ориентировалось на количественный учет таких важнейших параметров, как степень деформации и структура материала.

На основе представлений об эквикогезивном состоянии материала была постулирована реоло-

гическая модель SP-среды, учитывающая структурный фактор в виде

$$\dot{\varepsilon}_u = \dot{\varepsilon}_{eq} \exp \left[\alpha \Omega^\beta (\sigma_u - \sigma_{eq}) \right] \left(\frac{\sigma_u - \sigma_0}{\sigma_s - \sigma_u} \right)^{1/m_v}, \quad (16)$$

где σ_{eq} и $\dot{\varepsilon}_{eq}$ – напряжение и скорость деформации, соответствующие эквикогезивному состоянию. Параметры *эквикогезивного состояния* σ_{eq} и $\dot{\varepsilon}_{eq}$ могут быть определены по точке пересечения двух или более кривых $\sigma_u(\dot{\varepsilon}_u)$ УМЗСП сплава, соответствующих различным размерам зерен. Для большинства УМЗСП сплавов $\sigma_{eq} \approx 0,5\sigma_s$; Ω – структурный термоактивируемый параметр, зависящий от среднего размера зерен сплава; α и β – параметры, характеризующие степень влияния структурного параметра на скорость деформации.

Уравнение (16) описывает весь массив экспериментальных данных для каждого конкретного сплава, независимо от его структурного состояния, с весьма высокой точностью и рекомендуется для использования при расчете технологии таких процессов сверхпластического деформирования, для которых параметры структуры являются определяющими (например, сверхпластическая формовка, формовка, совмещенная с диффузионной сваркой, и др.).

Если необходимо количественно описывать более узкий скоростной интервал сверхпластичности в области скоростей, соответствующих максимальной величине показателя скоростного упрочнения m , то обычно для зависимости интенсивности напряжений течения σ_u от интенсивности скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_u$ используют уравнение вида

$$\sigma_u = k_0 \exp[Q_d / (RT)] \dot{\varepsilon}_u^m \Omega^f, \quad (17)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от химического состава сплава; Q_d – кажущаяся энергия активации сверхпластической деформации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура деформации, К; m – показатель скоростного упрочнения; Ω – обобщенный структурный параметр; f – показатель структурного упрочнения материала.

Еще один вариант аппроксимации механических свойств [9] с параметрами, зависящими от температуры, с учетом деформационного упрочнения, который применяется для процессов с примерно постоянной, заданной скоростью деформации, выглядит следующим образом:

$$\sigma = A(T)(\dot{\varepsilon}_{opt}(T))^m \varepsilon^n D_0(T) K_{shift}(T). \quad (18)$$

Здесь T – температура; первая составляющая $A(T)(\dot{\varepsilon}_{opt}(T))^m$ – температурная зависимость напряжения течения от скорости деформации и m – показатель чувствительности напряжения к скорости деформации. Вторая составляющая (ε^n) – параметр расчета деформационного упрочнения. Третья составляющая оценивает начальное структурное состояние сплава $D_0(T)$ и вносит поправку смещения $K_{shift}(T)$ на уровень напряжения течения, обусловленную стартовой стабилизацией структуры. Параметр D_0 нормируется на среднее арифметическое размеров частиц α - и β -фаз

$$D_0 = ((L_\alpha L_\beta)^{0,5} \cdot L_\beta / L_\alpha) / ((L_\alpha + L_\beta) / 2), \quad (19)$$

поскольку этот параметр предназначен для коррекции данных в случае отличий состава разных плавок или технологий изготовления листов.

Достаточно распространенным является и соотношение, описывающее напряжение течения в зависимости от степени и скорости деформации при заданной температуре в виде

$$\sigma_u = A \dot{\varepsilon}^{m(\varepsilon)}. \quad (20)$$

Заключение. В каждом конкретном случае в зависимости от продолжительности процесса сверхпластической деформации, требуемой точности прогнозирования при математическом моделировании и т.п. может быть выбрана та или иная модель среды. Очень важно, чтобы при выполнении расчетов построенные алгоритмы позволяли получать решение для различных вариантов аппроксимации физических соотношений, связывающих интенсивность напряжений с интенсивностью скорости и степени деформации, температурой и размерами структурных составляющих материала.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований МИЭМ НИУ ВШЭ и в рамках государственного задания № 11.1855.2014 Минобрнауки России.

Библиографический список

1. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.А. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
2. Novikov I.I., Portnoy V.K. Superplastizitat von Legierungen, Springer-Verlag. Berlin, 1984.
3. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 320 с.

4. Сверхмелкое зерно в металлах. Пер. с англ. / Под ред. Л.К.Гордиенко. М. : Металлургия, 1973. 384 с.

5. Nieh T.G., Wadsworth J., Sherby O.D. Superplasticity in Metals and Ceramics. Cambridge University Press, 1997.

6. Chumachenko E.N. Development of computer simulation of industrial superplastic sheet forming // Materials science and engineering A. 2009. Vol. 499, No 1/2. P. 342–346.

7. Смирнов О.М. Особенности сверхпластической деформации железоуглеродистых сплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2003. № 5. С. 36–41.

8. Чекин А.В., Смирнов О.М., Ершов А.Н., Цепин М.А. Реологическое поведение сверхпластичных нанокристаллических и аморфных материалов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 4. С. 18–26.

9. Чумаченко Е.Н. Моделирование процесса деформирования оболочек из титановых сплавов в условиях пониженных температур сверхпластичности // Известия РАН. МТТ. 2004. № 6. С. 151–166.

MECHANICAL TESTING AND CONSTRUCTION OF ANALYTICAL MODELS OF BEHAVIOR OF MATERIALS UNDER CONDITIONS OF SUPERPLASTICITY. Part II

© **Chumachenko E.N.**, Portnoy V.K., Logashina I.V.

The various test methods for determining the mechanical properties of materials in a state of superplasticity were considered. The tension depends from the deformation and strain rate, the structural parameter and temperature. The rheology and mechanics of superplastic deformation were discusses. Methodology has been tested and gave good results when tested Ti alloys and constructing mathematical models commissioned by EADS (Airbus). Information about the method of testing and subsequent approximation of the mechanical properties is of great interest for the development of adequate forecasts materials forming by pressure.

Keywords: mechanical properties of materials; superplasticity; simulations; mechanical tests.

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

Более 1 млрд руб. направлено на модернизацию оборудования ЕВРАЗ ЗСМК в 2014 г.

В 2014 г. ЕВРАЗ ЗСМК инвестировал в техническое перевооружение, замену и модернизацию оборудования более 1 млрд руб. Планомерная работа в этом направлении позволяет комбинату повышать эффективность производства, оставаясь одним из лидеров рынка металлопроката.

В 2014 г. техническое перевооружение затронуло практически все подразделения ЕВРАЗ ЗСМК. На площадке строительного проката в механическом цехе установлен современный станок с программным управлением, обеспечивающий точность при изготовлении деталей и позволяющий сокращать затраты на обработку запасных частей для ремонтов основного оборудования комбината. В сталеплавильном производстве в рамках реконструкции конвертера № 2 заменен котел-охладитель, в результате чего увеличилась интенсивность дутья в агрегате и повысилась его производительность. Также установлена новая машина для завалки скрапа в конвертер. В сортопрокатном цехе в ходе капитального ремонта на стане 250-2 установлено новое оборудование для резки металлопроката. За счет автоматизированного управления агрегатом увеличился выход годного продукта. Новый тушильный вагон приобретен для коксового цеха. Замена вагона позволила поддержать производительность коксовых батарей, повысить качество выпускаемого кокса и снизить просыпи готового продукта.

На площадке железнодорожного проката в рельсобалочном цехе был запущен в эксплуатацию станок для нарезки проб и исправления дефектов металлопроката, что позволило повысить производительность на участке отделки металла и увеличить выход готовой рельсовой продукции. В центральной лаборатории комбината установили новый газоанализатор, использование которого позволило сократить время на аттестацию рельсовой продукции.

В 2015 г. техническое перевооружение комбината будет продолжено.

*Региональный центр корпоративных отношений «Сибирь»
Управление по связям с общественностью*