

4. Чмырков К. Ф. Снижение расхода чугуна в шихте конвертерной плавки за счет использования железосодержащих карбидокремневых брикетов / К. Ф. Чмырков, Б. М. Бойченко, К. Г. Низяев, А. Н. Стоянов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – С. 21–23.

5. Бойченко Б. М. Целесообразные размеры кусков твердых материалов, используе-

мых при конвертерной плавке. Научные сообщения Десятой Всесоюзной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов / Б. М. Бойченко, Ю. Н. Борисов, В. И. Баптизманский. – Москва: Черметинформация. – 1991. – Ч. II. – С. 187–189.

Поступила 22.01.2016



УДК 669.184

Наука

А. А. Похвалитый, А. Д. Кулик /к. т. н./,  
Е. Н. Сигарев /д. т. н./, К. И. Чубин /к. т. н./,  
М. А. Кашеев /к. т. н./

Днепродзержинский государственный  
технический университет

А. Н. Стоянов /к. т. н./

Национальная металлургическая академия  
Украины

## Высокотемпературное моделирование выпуска плавки из конвертера с подачей аргона в полость летки

*Выполнено высокотемпературное моделирование выпуска плавки из конвертера с обработкой металлического потока аргоном. Получены данные о поведении потока и отдельных его частиц при различных режимах обработки аргоном с учетом особенностей конструкции летки. (Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.).*

**Ключевые слова:** конвертер, летка, аргон, газо-металлический поток, углеродное раскисление, высокотемпературное моделирование.

*High-temperature modeling of tapping from the converter with processing of a metal flow by argon is performed. Data on behavior of a flow and its particles at different modes of processing by argon taking into account features of taphole construction are obtained.*

**Key words:** converter, taphole, argon, gas-metal flow, carbon deoxidation, high-temperature modeling.

### Введение

Получение металлопродукции с высокими показателями качества во многом зависит от технологии производства. В сталеплавильном производстве повышение показателей чистоты стали по вредным примесям напрямую зависит от технологии раскисления. Наиболее распространенным является метод глубинного раскисления, когда кислород из металла удаляют с применением металлических раскислителей (Al, FeSi, FeMn и др.). При этом продукты раскисления удаляются в шлак не полностью и нередко становятся причиной брака заготовки по неметаллическим включениям (НВ). Для снижения количества НВ существует ряд технологий, применяемых на разных этапах производства стали, начиная от выплавки в конвертере и заканчивая разливкой и кристаллизацией.

Наиболее «чистой» (эффективной) технологией раскисления является углеродное раскисление. При этом продукты раскисления удаляются в газовую фазу в виде CO и CO<sub>2</sub>. Согласно литературным данным при создании разрежения (вакуумировании) раскисляющая способность углерода может превосходить даже алюминий.

Многочисленные исследования свойств углерода указывают на возможность протекания углеродного раскисления при продувке аргоном без создания разрежения. Снижения окисленности достигают за счет послепродувочного перемешивания аргоном при комбинированной продувке конвертерной ванны с расходом газа 0,4–1,2 м<sup>3</sup>/т стали [1]. В конвертере степень раскисления металла снижается за счет активного перемешивания с высокоокисленным шла-

ком, что снижает эффективность использования аргона. Подача указанного количества аргона в ковш требует значительного увеличения времени обработки.

В работе [2] предложено в летке выполнять рафинирование металла наряду с отсечкой шлака. Авторы работы утверждают, что при обработке в летке аргоном металла, который выпускается из конвертера, возможно удаление из него примесей и газов. Кроме того, осуществление рафинирования металла в период его выпуска из конвертера, в отличие от наиболее часто применяемого варианта, так называемого внепечного рафинирования, позволяет проводить обработку газом меньших объемов расплава металла, поскольку при осуществлении предлагаемого способа происходит вдувание газа в струю металла, ограниченную размерами летки конвертера. Таким образом, рафинирование расплава металла в области летки конвертера позволяет снизить давление и расход газа, что сокращает энергозатраты на реализацию процесса.

Обработка металла инертным газом в летке в обязательном порядке скажется на характере организации открытой части потока. Влияние расходных характеристик газа и геометрических параметров летки на формирование газо-

жидкостного потока с различной степенью организации выполнено только в [3; 4] на холодных моделях. Однако высокотемпературных исследований с формированием газо-металлического потока (ГМП) в полости летки до настоящего времени не проводилось. Очевидно, это связано со сложившимся мнением, что любое нарушение сплошности (организации) потока металла во время выпуска плавки приведет к увеличению поверхности контакта с воздухом и последующему насыщению стали составляющими атмосферы кислородом, влагой и азотом.

#### Цель работы

Исследование особенностей поведения металла в потоке аргона в полости летки и вне ее при выполнении высокотемпературного моделирования выпуска плавки из конвертера.

#### Методика исследования

Для изучения процессов формирования газо-металлического потока во время выпуска плавки из конвертера (рис. 1) при подаче газа в полость летки выполнено высокотемпературное моделирование с использованием специального стенда (рис. 2). Масштабный коэффициент принят равным 0,2. Эксперименты выполнены на базе сталеплавильной лаборатории кафедры МЧМ ДГТУ. Моделирующие среды: жидкий металл – чугун, инертный газ – аргон.

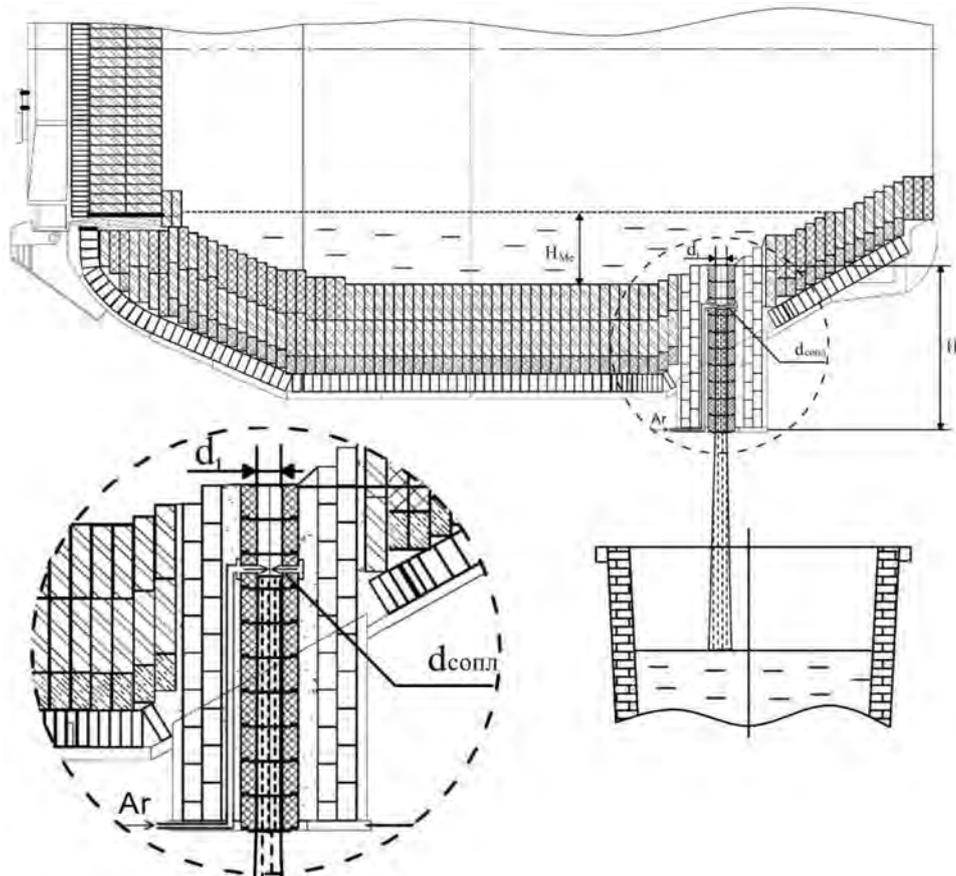
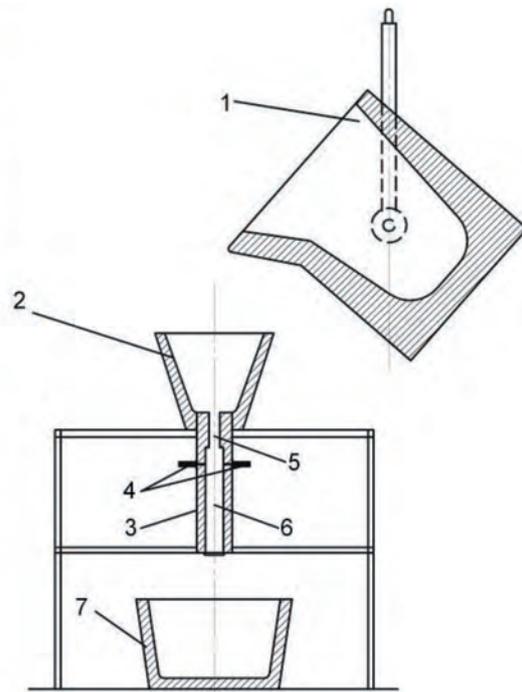


Рис. 1. Схематическое изображение процесса выпуска плавки из конвертера с подачей газа в полость летки



а)



б)

Рис. 2. Лабораторная установка для подачи газа в полость летки (а) и её схема (б):

1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточная емкость, моделирующая уровень металла в конвертере; 3 – двухкамерная летка; 4 – сопла для подачи газа в полость летки; 5 – первая камера летки; 6 – вторая камера летки (расширенная); 7 – приемный ковш

В индукционной тигельной печи типа ИСТ-0,16 расплавляли чугун массой 100 кг и доводили до температуры 1400–1600 °С. По достижении необходимой температуры чугун сливали в предварительно разогретый до 600–800 °С сталеразливочный ковш 1. Затем из сталеразливочного ковша 1 чугун выпускали в специальную промежуточную емкость 2, моделирующую уровень металла в конвертере в положении выпуска. Из промежуточной емкости 2 металл попадал в двухкамерную летку 3, где происходила его обработка аргоном с последующим выпуском газо-металлического потока в приемный ковш 7.

Видеофиксацию лабораторных исследований выполняли с помощью видеокамер в режиме обычной (30 кадров в секунду) и скоростной (300 кадров в секунду) съемки.

#### Особенности технологии

1. Уровень металла в промежуточной емкости 2 был принят равным  $h_{Me} \approx 0,2$  м в соответствии с методикой, приведенной в работе [5] (с учетом масштабного коэффициента), и поддерживался постоянным на протяжении всего выпуска плавки за счет непрерывного доливания чугуна из сталеразливочного ковша 1.

2. Модель летки принята двухкамерной, как в работе [4], т. к. при холодном моделировании она имела наиболее близкие к опти-

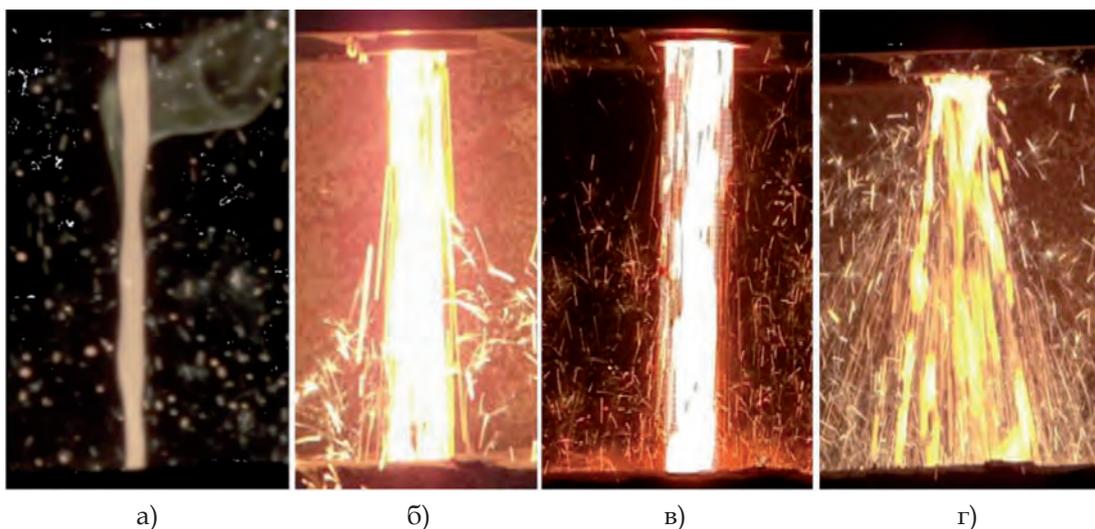
мальным расходные и гидродинамические характеристики. Первая камера 5 со стандартным диаметром  $d_1$  выполняет функцию дозатора металла. Вторая (расширенная) камера 6 диаметром  $d_2 = (1,2...1,5)d_1$  оснащена соосно-расположенными соплами 4 цилиндрической формы диаметром  $d_{сопл} = 2,3$  мм для подачи инертного газа.

#### Результаты исследований

Было проведено несколько серий опытных плавов, в процессе которых реализованы различные режимы истечения потока через опытную летку.

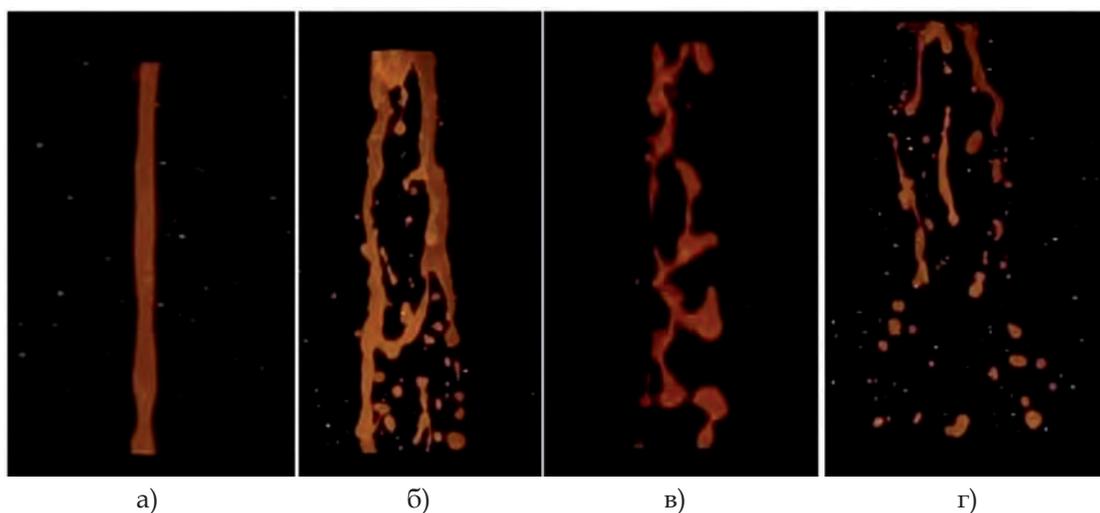
На рис. 3а и 4а показано состояние струи при обычном истечении металла без продувки аргоном. Наблюдается пульсация потока с удовлетворительной организацией на участке вне летки. Однако при таком выпуске плавки вокруг потока имеет место эффект горения пламени. Скорее всего, при обычном выпуске (без подачи газа) происходит контакт струи высокоуглеродистого металла с окружающей атмосферой и взаимодействие молекул кислорода с адсорбированными на поверхности струи атомами углерода. Похожий «пламенный» эффект наблюдается при выпуске из конвертера углеродистых марок сталей.

Во второй серии экспериментов выпуск плавки выполняли с продувкой металла через два



**Рис. 3. Состояние потока при обычной съемке (30 кадров в секунду):**

а – поток без подачи газа; б – ГМП с продувкой через 2 сопла; в – ГМП с продувкой через 4 сопла; г – ГМП при выпуске через «замороженную летку»



**Рис. 4. Состояние потока при скоростной съемке (300 кадров в секунду):**

а – поток без подачи газа; б – ГМП с продувкой через 2 сопла; в – ГМП с продувкой через 4 сопла; г – ГМП при выпуске через «замороженную летку»

соосно-расположенных сопла во второй камере летки (рис. 3б и 4б) при расходе аргона  $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$  и давлении  $0,5 \text{ МПа}$ , что соответствует удельному расходу  $1 \text{ м}^3/\text{т}$  стали. Из рис. 3б видно, что ГМП имеет достаточно высокую организацию с незначительным отделением частиц потока. На рис. 4б наблюдается образование частиц с разной степенью дисперсности вплоть до сплошных струй. Наличие слабо раздробленных струй объясняется малым количеством продувочных сопел, однако присутствие мелких частиц в потоке свидетельствует о высоком перемешивающем потенциале газовых струй.

В третьей серии экспериментов выпуск плавки выполняли с продувкой металла через четыре соосно-расположенных сопла во второй камере летки (рис. 3в и 4в) при расходе аргона

$0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$  и давлении  $0,3 \text{ МПа}$ . Из рис. 3в видно, что организация ГЖП повысилась и отделение частиц практически не наблюдалось. Данные высокоскоростной съемки (рис. 4в) указывают на повышение равномерности дробления потока, однако размеры частиц увеличились. Причиной большего размера частиц стало снижение перемешивающего эффекта газа из-за понижения давления дутья. Снижение давления дутья, в свою очередь, произошло из-за увеличения количества сопел и суммарной площади их сечения.

В четвертой серии экспериментов соблюдались условия третьей серии, однако наблюдалось интенсивное разбрызгивание ГМП (рис. 3г и 4г). Этому послужило снижение площади сечения второй камеры в результате намораживания чугуна на ее стенки. Намораживание чугуна

на произошло из-за недостаточного разогрева второй камеры (500...600 °С) летки, состоящей из корундографитового огнеупора, отличающегося высокой теплопроводностью. Можно утверждать с некоторым приближением, что в данном случае выпуск происходил с продувкой через однокамерную летку. Более того, характер разбрызгивания ГМП имел большое сходство с газо-жидкостным потоком, полученным при продувке в однокамерной летке на этапе холодного моделирования [4].

Общим позитивным моментом второй (два сопла) и третьей (четыре сопла) серии опытов является то, что движение разной формы и размеров частиц металла вне летки происходит практически в русле аргонного газового потока по пути движения к зеркалу в ковше, т. е. в направлении, заданном профилем второй камеры летки. Это является свидетельством хорошей организации аргонно-металлического потока и подтверждением правильности выбранных параметров-профилеразмеров второй камеры.

С другой стороны, результаты четвертой серии – получение рассеянной, неорганизованной струи – подтверждают решающее значение для стадии выпуска температурного состояния и выпускаемого жидкого металла и материала огнеупоров для получения хорошо организованного газо-металлического потока, что является решающим и для обычной практики выпуска.

Таким образом, третья и четвертая серии экспериментов доказывают большую значимость при продувке газами металла в полости летки наличия второй расширенной камеры оптимального профиля (в нашем случае он цилиндрический) и оптимальных размеров. С учетом данных моделирования [3; 4] размеры летки для 250-тонного конвертера имеют следующие значения, мм:

а) первая камера: диаметр  $d_1 = 150$ , длина  $l_1 = 400$ ;

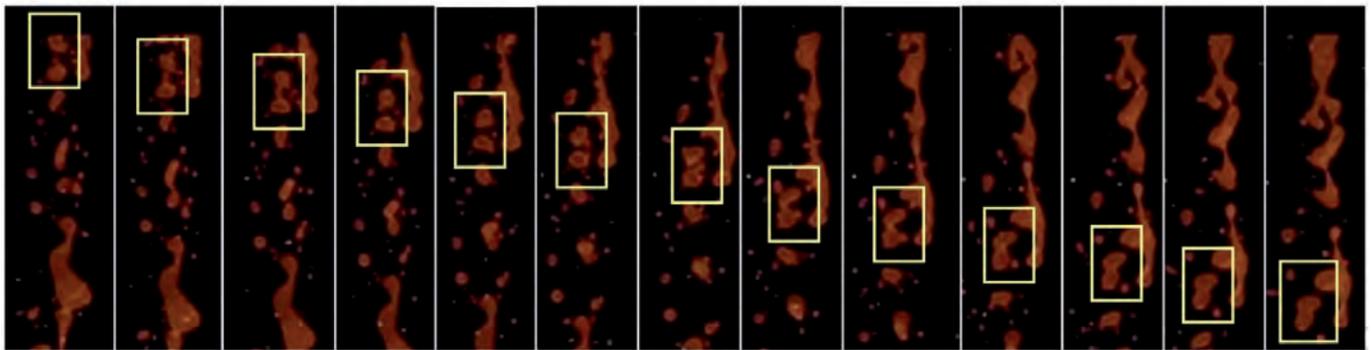
б) вторая камера: диаметр  $d_2 = 180...200$ , длина  $l_2 = 1500$ .

Интенсивное перемешивание аргона с металлом происходит внутри полости леточного канала, особенно в зоне газовых сопел, фактическую реальную картину протекания которых при данном моделировании зафиксировать не удалось из-за непрозрачности фурменного узла (выполнить его в настоящее время практически невозможно). Однако, как показали данные скоростной видеосъемки на открытом участке аргонно-металлического потока, т. е. вне леточного канала, частицы металла разной фракции движутся в потоке с аргоном в одном направлении, но с разными скоростями. В свою очередь, частицы размером до 3...5 мм по ходу движения эпизодически коалесцируют и дробятся. Судя по всему, процессы коалесценции и дробления капель металла продолжаются на всем протяжении открытой части аргонно-металлического потока. Наглядно этот процесс в виде серии скоростных снимков показан на рис. 5. Поведение во времени двух наблюдаемых частиц, близких по форме к шарообразной, выделено на фрагментах аргонно-металлического потока прямоугольниками. Начало слияния наблюдается на 7-8-м фрагментах, окончание – на 13-14-м. Из приведенных фрагментов видно изменение формы и положения других, более крупных, фрагментов жидкой фазы.

Из рис. 5 видно, что поверхность раздела между металлом и газом постоянно меняется и обновляется, что способствует протеканию поверхностных процессов. К ним относятся процессы углеродного раскисления, дегазации (удаления из металла водорода, азота), десульфурации.

**Выводы**

1. При выполнении высокотемпературного моделирования выпуска плавки из конвертера подтверждена возможность получения направ-



**Рис. 5. Серия высокоскоростных снимков, характеризующих процессы коалесценции и дробления капель металла в открытой части аргонно-металлического потока**

ленного, организованного газо-металлического потока при использовании двухкамерного ленточного канала, вторая камера которого снабжена в верхней части соплами для подачи нейтральных газов с расходом до 1 м<sup>3</sup>/т.

2. С помощью скоростной видеосъемки впервые изучены особенности поведения частиц разных фракций и крупных фрагментов жидкого металла в потоке аргона вне летки. Обнаружены процессы слияния и разделения этих частиц, движущихся с различными скоростями, зона и направление движения которых определены размерами второй камеры и расходными параметрами аргона.

#### Библиографический список

1. Рафинирование металла от углерода и кислорода с помощью залповой продувки аргоном в конвертере / А. Я. Стомахин, Г. И. Васильев, В. В. Рябов, М. Г. Королев [и др.] // Труды второго конгресса сталеплавателей. (Липецк, 12-15 октября 1995 г.). – Москва, 1994. – С. 105-107.

2. Декл. пат. на кор. мод. України 37723 / Спосіб відділення металу і шлаку; С21С 5/42,

С21С 5/46, F27D 3/00 / Ю. О. Гічов, С. В. Бичков, О. О. Малик, Ю. І. Жаворонков [та ін.]. № u200807517; Заявл. 02.06.2008; Опубл. 10.12.2008, Бюл. № 23. – 3 с.

3. Кулик А. Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А. Д. Кулик, М. А. Кашеев, А. А. Похвалитый // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 1. – С. 18-20.

4. Совершенствование выпуска стали из конвертера. Двухкамерная летка / А. А. Похвалитый, А. П. Огурцов, А. Д. Кулик, М. А. Кашеев // *Черная металлургия: бюллетень науч.-техн. и экон. информ.* – 2015. – № 6. – С. 16-19.

5. Огурцов А. П. Влияние геометрических параметров конвертера на процесс выпуска плавки / А. П. Огурцов, А. Д. Кулик, А. А. Похвалитый // *Збірник статей 25 міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал світової науки – ХХІ сторіччя» (Запоріжжя, 3-7 березня 2014 р.)*. – Запоріжжя, 2014. – С. 85-89.

**Поступила 19.01.2016**



METAL  
JOURNAL

[www.metaljournal.com.ua](http://www.metaljournal.com.ua)