

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ АЛМАЗНОГО СЛОЯ С ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПОДЛОЖКОЙ ПАЯНЫХ РЕЗЦОВ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РЕСУРС

Б. В. СТЕФАНИВ, О. М. САБАДАШ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Ресурс эксплуатации буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами определяется величиной проходки в условиях абразивного, эрозивного, коррозионного изнашивания при бурении дегазационных скважин. В работе проведена оценка износа и микроструктуры соединения алмазного слоя с твердосплавной подложкой цельного резца «Syndrill» фирмы «Element Six» (Ирландия) и составного резца (ИСМ НАНУ) буровых долот после отработки их ресурса. Показано, что в цельных резцах кобальт равномерно распределен в алмазном слое и его количество составляет до 2,06 мас. % в отличие от составных, где количество кобальта — 4,35 мас. %. Увеличение содержания кобальта и уменьшение объемного содержания алмазных зерен в алмазном слое составных резцов снижают их термостойкость и износостойкость. Пористость составных алмазно-твердосплавных резцов больше в 2 раза по сравнению с цельными резцами «Syndrill», что способствует проникновению большего количества элементов припоя (меди и цинка) в переходную зону соединения твердосплавной подложки и алмазного слоя. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: долото, алмазный слой, алмазно-твердосплавный резец, алмазно-твердосплавная пластина, твердосплавная подложка, спеченный материал, пайка, припой, микроструктура, пористость, износ

Ресурс рабочих органов буровых долот, оснащенных цельными и составными алмазно-твердосплавными резцами, зависит, в основном, от физико-химических свойств алмазного слоя и адгезии его к твердосплавной подложке после воздействия на него термического цикла пайки, а также прочностных и коррозионных свойств паяного соединения «АТР-лопасть рабочего органа долота» [1–4].

Высокая скорость износа вызвана различиями в скорости теплового расширения между алмазными частицами и кобальтом, а также высокой температуры, которая оказывает влияние на кинетику химических реакций между кобальтом и алмазными частицами и процесса графитизации алмазного слоя. Значительное различие в коэффициентах теплового расширения алмазных частиц $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и кобальта $12,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ обуславливает высокие уровни термомеханических напряжений в переходной зоне соединения АТР.

Графитизация алмазного слоя резцов «Syndrill» фирмы «Element-6» (Ирландия) существенно ускоряется при температурах выше $800 \text{ } ^\circ\text{C}$, а для резца алмазно-твердосплавной пластины (АТП) ИСМ НАНУ выше $680 \text{ } ^\circ\text{C}$ [2], что приводит к деградации режущей кромки и увеличению износа резцов, ухудшению эффективности породоразрушающего инструмента и уменьшению величины проходки (рис. 1).

Цель работы — исследование влияния микроструктуры соединения алмазного слоя с твердос-

плавной подложкой АТР буровых долот на их эксплуатационный ресурс.

Испытания буровых долот проводили при бурении дегазационных скважин на 12-м западном вентиляционном штреке пласта L_1 в Донбассе. Для бурения скважин использовали электрогидравлическую установку глубинного бурения типа GBH 1/89/12 фирмы «Дайльман-Ханиэль» (Германия) при углах бурения к горизонту от 8 до 60° . Режим бурения: номинальная частота вращения шпинделя установки $70 \dots 100 \text{ мин}^{-1}$; усилие подачи бурового инструмента $50 \dots 100 \text{ кН}$. Бурение дегазационных скважин длиной до 150 м проводили по вмещающим горным породам, представленными алевролитами и абразивными песчаниками с пределом прочности одноосному сжатию до 120 МПа . Для промывки скважин и охлаждения бурового инструмента расход технической воды составлял до 50 л/мин .

Цельные и составные АТР были запаяны в гнезда лопасти буровых долот с помощью серебряного припоя ВAg-1а в температурном интервале $650 \dots 680 \text{ } ^\circ\text{C}$. После отработки определенного эксплуатационного ресурса рабочих органов стальных долот (рис. 1), резцы были выпаяны из гнезд лопасти. Общее время выдержки τ при температуре пайки АТР составляло $\tau = 90 \dots 120 \text{ с}$.

Исследование микроструктуры соединения твердосплавной подложки с алмазным слоем проводили на металлографических шлифах (поперечный разрез, износ режущей кромки составлял



Рис. 1. Внешний вид изношенных резцов лопасти стального бурового долота (×3): а — ATP «Syndrill» после проходки 1000 м; б — составной резец ATP ИСМ НАНУ после проходки 250 м

около 2 мм) с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 XV.P (Karl Zeiss, Германия), оснащенного энергодисперсионным анализатором INCA-energy 450 (Oxford Instruments, Англия).

Распределение основных элементов (рис. 2) в характеристическом излучении вольфрама, кобальта, углерода указывает на присутствие углерода в алмазосодержащем слое (справа) и на участке, граничащем с твердосплавной подложкой (слева) цельного ATP «Syndrill» фирмы «Element Six» (Ирландия). Вольфрам и кобальт находятся в твердосплавной подложке и переходной зоне с алмазным слоем.

Соединение цельного резца (ATP) условно состоит из трех характерных участков: твердосплавной подложки А, переходной зоны В, С, D, алмазного слоя Е, которые отличаются неоднородной микроструктурой (рис. 3) и различным химическим составом (табл. 1).

Таблица 1. Содержание элементов (мас. %) в исследуемых участках ATP «Syndrill»

Участки	C	Co	W	Ni	Cu	Zn
А	29,42	3,92	65,03	1,63	-	-
В	42,27	2,82	41,02	1,20	3,63	2,18
С	41,15	2,83	48,98	1,45	5,59	-
Д	89,20	1,55	4,07	-	2,18	3,00
Е	94,96	2,06	2,31	0,67	-	-

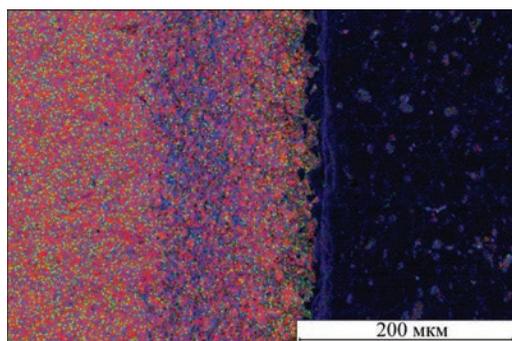


Рис. 2. Распределение элементов в характеристическом излучении ATP «Syndrill»: углерод — синий, вольфрам — красный, кобальт — зеленый

Твердосплавная подложка А состоит из мелкодисперсных частиц карбида вольфрама (светло-серые), связанных сплавом на основе кобальта (серые), содержащего до 1,63 мас. % никеля, микроструктура которой присуща твердосплавному спеченному материалу системы WC-Co. Никель используется в качестве катализатора [5] при спекании мелкодисперсных порошков.

Твердый спеченный материал системы WC-Co (участок В, шириной около 10 мкм) с меньшим количеством кобальта (2,82 мас. %), дополнительно содержит отдельную фазу из сплава меди с цинком с соотношением этих элементов 1,7/1. Участок С шириной около 120 мкм (рис. 6, а) имеет более измельченную микроструктуру карбидов вольфрама, матрица состоит из спеченного материала системы WC-Co и дополнительно содержит, мас. %: 1,45 Ni и 5,59 Cu. Переходная зона (участок D шириной около 10 мкм) имеет неоднородную структуру спеченного материала систем WC-Co (светлые) и C-Co (темные), который содержит включения из сплава меди с цинком с соотношением этих элементов 0,73/1. Алмазный слой (участок Е) состоит из зерен поликристаллических алмазов, связанных сплавом на основе кобальта, и содержит, мас. %: 94,96 C; 2,06 Co (темный); 2,31 W и 0,67 Ni.

Распределение основных элементов (рис. 4) в характеристическом излучении вольфрама, ко-

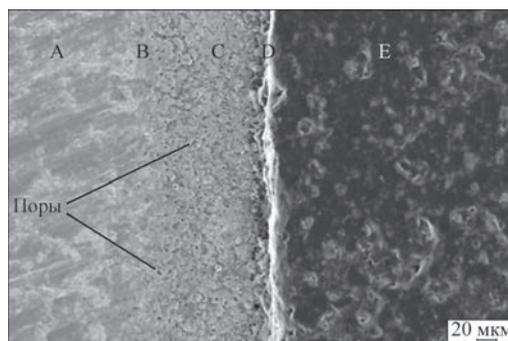


Рис. 3. Микроструктура ATP «Syndrill»: А — твердосплавная подложка, (В, С, D) — переходная зона, Е — алмазосодержащий слой

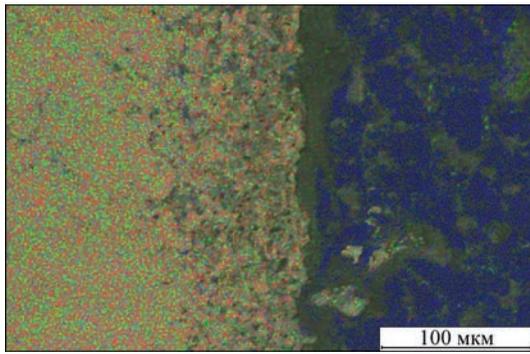


Рис. 4. Распределение элементов в характеристическом излучении АТП (ИСМ НАНУ): углерод — синий, вольфрам — красный, кобальт — зеленый

бальта, углерода составного резца АТП (ИСМ НАНУ) указывает на присутствие углерода в алмазном слое (справа) и меньшей интенсивности спектра на участке, граничащем с твердосплавной подложкой (слева). Вольфрам и кобальт распределены в твердосплавной подложке. На участке переходной зоны с алмазным слоем обнаружено локальное распределение кобальта (зеленый спектр).

Соединение составного резца, по аналогии с предыдущим АТР, состоит из трех характерных участков, отличающихся неоднородной микроструктурой (рис. 5) и различным химическим составом (табл. 2).

Твердосплавная подложка F включает более крупные частицы карбида вольфрама (светло-серые) в кобальтовой матрице (серые). Она по структуре подобна промышленному спеченному материалу, а по химическому составу близка к сплаву ВК12. Кобальтовая матрица G спеченного материала системы WC-Co шириной около 10 мкм, с относительно меньшим количеством кобальта 9,16 мас. %, дополнительно содержит отдельную фазу в виде сплава меди с цинком. Участок H шириной около 90 мкм (рис. 6, б) переходной зоны характеризуется крупными зёрнами карбидов спеченного материала системы WC-Co и дополнительно содержит отдельную фазу меди и цинка в соотношении этих элементов 2,3/1. Участок I шириной около 10 мкм имеет неоднородную микроструктуру, присущую спеченному материалу из порошков карбида вольфрама и алмаза систем WC-Co (светлые) и C (алмаз) — Co (темные), а также содержит включения фазы из сплава меди с цинком в соотно-

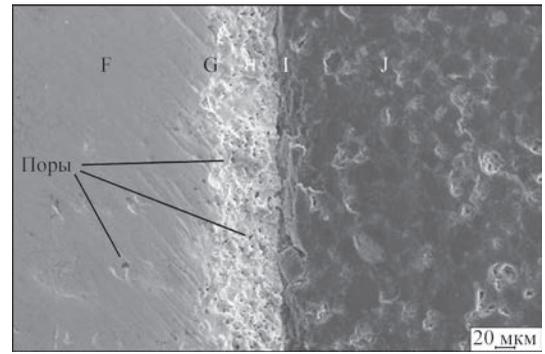


Рис. 5. Микроструктура составного резца АТП (ИСМ НАНУ): F — твердосплавная подложка, (G, H, I) — переходная зона, J — алмазный слой

шении 1,6/1. В алмазном слое J содержится, мас. %: 89,92 C; 4,32 Co; 5,73 W.

По результатам исследований установлено, что содержание углерода закономерно изменяется при переходе от твердосплавной подложки к алмазному слою на отдельных участках, мас. %: 29,42 (A), 42,27 (B) и 41,15 (C) и резко возрастает от 89,2 (D) до 94,96 (E). Количество кобальта (см. табл. 1) соединения АТР на участках составляет, мас. %: 3,92 (A) и 2,83 (C), а в алмазном слое 2,06 (E). Содержание вольфрама, наоборот, уменьшается от участка A до участка E, а в алмазном слое его содержание составляет всего несколько процентов. Закономерность изменения содержания углерода и кобальта подтверждает сложную структуру композиционного материала АТР, состоящего из спеченных мелкодисперсных порошков систем: WC-Co (твердосплавная подложка), WC-C-Co (переходная зона), C-Co (алмазный слой).

Химический состав составного АТР также закономерно изменяется на отдельных участках, мас. %: углерод — 10,48 (F), затем повышается до 19,07(G) и уменьшаются до 10,46 (H), а при переходе границы повышается до 67,48 (I) и возрастает в алмазном слое до 89,92(J). Количество кобальта (см. табл. 2) на участках соединения составного АТР соответственно составляет, мас. %: подложка — 12,22 (F), переходная зона — 9,16 (G), — 5,36(H), — 7,96(I), а в алмазном слое — 4,35 (E).

На исследуемых участках переходной зоны твердосплавной подложки и алмазного слоя цель-

Таблица 2. Содержание элементов (мас. %) в исследуемых участках АТП (ИСМ НАНУ)

Участки	C	Co	W	Cu	Zn
F	10,48	12,22	77,30	-	-
G	19,07	9,16	65,22	4,11	2,44
H	10,46	5,36	52,99	21,8	9,39
I	67,48	7,96	13,75	6,76	4,05
J	89,92	4,35	5,73	-	-



Рис. 6. Микроструктура АТП с маркером ширины переходной зоны, мкм: а — «Syndrill», 140,6; б — АТП (ИСМ НАНУ), 90,82

ного и составного АТР присутствуют элементы из припоя: медь и цинк. Ширина переходной зоны твердосплавной подложки с алмазным слоем цельного АТР (рис. 6, а) примерно в 1,55 раза больше составного АТР (рис. 6, б).

Известно [6], что пористость составного отечественного резца АТП составляет 2...5 %. Можно предположить, что в процессах изготовления составного АТП [2] и крепления его [3] в отверстия лопастей происходят диффузионные процессы при пайке, когда элементы из припоя, в данном случае медь и цинк, проникают через поры в переходную зону. В работе [1] установлено, что при использовании серебряных припоев в технологических процессах пайки спеченных материалов системы WC-Co на приграничных участках с твердосплавной подложкой преимущественно формируется переходный слой из твердого раствора на основе меди с цинком. Пористость отечественных АТП примерно в 2 раза больше по сравнению с АТР фирмы «Element Six» (Ирландия), что способствует увеличению количества меди и цинка, которые формируют твердые растворы на основе меди с цинком переменного состава, на приграничных участках переходной зоны с твердосплавной подложкой и алмазным слоем.

В переходной зоне АТР «Syndrill» на исследуемых участках В, С, D присутствуют малого размера зерна WC и малое количество кобальта, которые увеличивают твердость и сопротивление износу за счет прочности. В составном АТР участки G, H, I переходной зоны присутствуют крупные зерна WC, высокое содержание кобальта снижает твердость и сопротивление износу, но повышает ударную вязкость спеченного сплава. В работе [7] показано, что более крупные зерна карбидов вольфрама (WC) способствуют увеличению пористости твердых сплавов.

Согласно результатам исследования соединения алмазного слоя и подложки в образцах, изготовленных фирмой «Element Six» (Ирландия) и АТП (ИСМ НАНУ), можно констатировать, что алмазный слой АТР «Syndrill» менее подвержен воздействию термического цикла пайки и имеет существенно больший ресурс и, соответственно, величину проходки бурового долота. Высокое объемное содержание алмазных зерен и строго ограниченное количество связующего порошка кобальта в поликристаллическом слое АТР повышает его прочностные свойства, термостойкость и сопротивление износу. Переходная зона АТР «Syndrill» имеет относительно большие размеры, мелкозернистую структуру карбидов вольфрама (WC) и низкое содержание кобальта, а также более низкую пористость по сравнению с АТП (ИСМ НАНУ), что способствует увеличению

твердости и релаксации остаточных напряжений в условиях переменного нагружения.

В настоящее время менее пористые спеченные материалы системы WC-Co изготавливают путем введения тонких частиц карбида вольфрама в кобальтовую матрицу и методом высокотемпературного синтеза в вакууме или в водородной атмосфере. Изменением содержания кобальта и размера тонкодисперсных частиц получают десятки стандартных классов твердых спеченных сплавов. Эти композиционные материалы сочетают твердость при ограниченной деформации с прочностью и сопротивлением к образованию трещин.

Выводы

1. Буровые долота, оснащенные цельными резцами, имеют больший (в 4 раза) эксплуатационный ресурс по сравнению с составными резцами, за счет высокого объемного содержания алмазных зерен и ограниченного количества связующего кобальта в поликристаллическом слое.

2. Компоненты припоя медь и цинк присутствуют на участках переходной зоны, граничащих с твердосплавной подложкой и алмазным слоем. Более высокая пористость составного АТР способствует увеличению количества сплава системы Cu-Zn.

Список литературы

1. Хорунов В. Ф., Стефанив Б. В., Сабадаш О. М. и др. (2012) Особенности технологий ремонта буровых долот с алмазно-твердосплавными резцами. *Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, споруд та машин. Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.* – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, сс. 488–493.
2. Стефанив Б. В. (2013) Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов. *Автоматическая сварка*, 2, 38–42.
3. Стефанив Б. В. (2013) Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота. *Там же*, 8, 50–54.
4. Стефанив Б. В., Хорунов В. Ф., Сабадаш О. М. и др. (2015) Особенности технологии ремонта изношенных рабочих органов стальных и матричных корпусов буровых долот. *Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, споруд та машин: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр.* – Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, сс. 688–696.
5. Чинтаманени Вамсее, Беллин Федерико (2013) *Высокотемпературная обработка при высокой скорости нагрева резцов pdc*. РФ, Пат. 2628593, МПК C21D 9/22, E21B 10/567.
6. Гончаренко И. М. *Физические основы разработки и производства твердых сплавов*. <http://portal.tpu.ru>
7. Besson Alain, Burr Bruce, Dillard Scott et al. (2000) On the Cutting Edge. *Oilfield Review*, 12, 3, 36–57.

References

1. Khorunov, V.F., Stefaniv, B.V., Sabadash, O.M. et al. (2012) Peculiarities of restoration technologies of drill bits with diamond-hard-alloy cutters. In: *Problems of life and safety of service of structures, constructions and machines*: Transact. of 2010-2012 results. Kyiv, PWI, pp. 488-493 [in Russian].
2. Stefaniv, B.V. (2013) Development of the technology of brazing diamond-hard-alloy cutters. *The Paton Welding J.*, 2, 37-41.

3. Stefaniv, B.V. (2013) Peculiarities of induction brazing of diamond-hard- alloy cutters to blade of body of complex drill. *Ibid.*, **8**, 49-53.
4. Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. et al. (2015) Peculiarities of restoration of working parts of drilling bits of steel and matrix bodies. *In: Problems of life and safety of service of structures, constructions and machines*: Transact. of 2013-2015 results. Kyiv, PWI, pp. 688-696 [in Russian].
5. Chintamaneni, V., Bellin, F. (2013) *High-temperature treatment at high heating rate of pdc cutters*. Pat. 2628593, RU, Int. Cl. C21D 9/22, E21B 10/567 [in Russian].
6. Goncharenko, I.M. Physical basics of development and manufacture of hard alloys. <http://portal.tru.ru>
7. Besson, A., Burr, B., Dillard, S. et al. (2000) On the cutting edge. *Oilfield Review*, 12(3), 36-57.

Б. В. Стефанів, О. М. Сабадаш

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ЗОНИ З'ЄДНАННЯ
АЛМАЗНОГО ШАРУ З ТВЕРДОСПЛАВНОЮ
ПІДКЛАДКОЮ ПАЯНИХ РІЗЦІВ
НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕСУРС

Ресурс експлуатації бурових доліт з алмазно-твердосплавними різцями визначається величиною проходки в умовах абразивного, ерозійного, корозійного зношування при бурінні дегазаційних свердловин. У роботі проведена оцінка зносу та мікроструктури з'єднання алмазного шару з твердосплавною підкладкою цільного різця «Syndrill» фірми «Element Six» (Ірландія) і складеного різця (ІСМ НАНУ) бурових доліт після відпрацювання їх ресурсу. Показано, що в цільних АТР кобальт рівномірно розподілений в алмазному шарі і його кількість складає до 2,06 мас. % на відміну від різців, де кількість кобальту — 4,35 мас. %. Збільшення вмісту кобальту і зменшення об'ємного змісту алмазних зерен в алмазному шарі різців знижують їх термостійкість і зносостійкість. Пористість складених алмазно-твердосплавних різців більше в 2 рази в порівнянні з цільними різцями «Syndrill», що спри-

яє проникненню більшої кількості елементів припою (міді і цинку) в перехідну зону з'єднання твердосплавних підкладки і алмазного шару. *Бібліогр.* 7, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: долото, алмазний шар, алмазно-твердосплавний різець, алмазно-твердосплавна пластина, твердосплавна підкладка, спечений матеріал, пайка, припій, мікроструктура, пористість, знос

B.V. Stefaniv, O.M. Sabadash

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

EFFECT OF STRUCTURE OF JOINT ZONE
OF DIAMOND LAYER WITH HARD-ALLOY SUBSTRATE
OF BRAZED CUTTERS ON THEIR SERVICE LIFE

Service life of drilling bits with diamond-hard-alloy cutters is determined by value of drifting under conditions of abrasive, erosion and corrosion wear in drilling of degassing holes. The work carried evaluation of wear and microstructure of joining of diamond layer with hard-alloy substrate of «Syndrill» integral cutter of «Element Six» company (Ireland) and composite cutter (ISM of NASU) of drilling bits after completion of their life. It is shown that cobalt in the integral cutter is uniformly distributed in the diamond layer and its amount makes up to 2.06% wt% in contrast to combined ones, where amount of cobalt is 4.35 wt%. Increase of cobalt content and decrease of volume content of the diamond grains in diamond layer of the composite cutters reduce their heat resistance and wear resistance. Porosity of composite diamond-hard-alloy cutters is 2 times more in comparison with integral «Syndrill» cutters that promote penetration of larger amount of brazing alloy elements (cooper and zinc) in a transition zone of joint of hard-alloy substrate and diamond layer. Ref. 7, Tabl. 2, Fig. 6.

Keywords: drilling bit, diamond layer, diamond-hard-alloy cutter, diamond-hard-alloy plate, hard-alloy substrate, sintered material, brazing, brazing alloy, microstructure, porosity, wear

Поступила в редакцію 29.11.2017



МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

VIII спеціалізована виставка «Метал. Обладнання. Інструмент 2018»

25–27 квітня 2018 р., Палац спорту «Україна», вул. Мельника, 18, м. Львів

Тематичні розділи виставки:

- ◆ обладнання для обробки металу ◆ металорізальні верстати та оснастка
- ◆ лазерне, плазмове обладнання і технології ◆ обладнання для розкрою листа і прокату
- ◆ металорізальні інструменти ◆ зварювальне обладнання ◆ ковальське обладнання та ін.

Детальна інформація про проект та архів заходів на сайті: <http://met.expolviv.ua>