

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА СЛОЕВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ В СТАЦИОНАРНОМ ТОКОПРОВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, И. П. ЛЕНТЮГОВ, В. А. ЖДАНОВ

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

Изучен характер изменения электротехнических параметров процесса плавления дискретной присадки при ее порционной подаче и изменении толщины наплавленного металла в стационарном токопроводящем кристаллизаторе. Установлено, что на процесс плавления в шлаковой ванне влияют начальные значения глубины и удельной электропроводности шлаковой ванны. Введено понятие усредненного теплового уровня шлаковой ванны, характеризующее изменение физических свойств и теплового состояния ванны в результате ввода в нее порций дискретной присадки и позволяющее оптимизировать первоначальное положение наплаваемой поверхности относительно токоведущей секции кристаллизатора. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, стационарный токопроводящий кристаллизатор, толщина наплавленного металла, глубина шлаковой ванны

Одним из главных преимуществ электрошлаковой наплавки (ЭШН) является возможность наплавки больших толщин металла без ухудшения качества как наплавленного металла, так и, в целом, биметаллического соединения.

Разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона секционный токопроводящий кристаллизатор (ТПК) [1–3] позволяет наплавать слои металла практически неограниченной толщины. Для этого необходимо обеспечить относительное перемещение изделия и ТПК.

В ряде случаев нет необходимости наплавать слишком большие толщины металла, что позволяет использовать ТПК в стационарном положении. При этом максимальная толщина наплаваемого металла определяется не только длиной формирующей секции кристаллизатора, но и химическим составом применяемого флюса [4].

Использование стационарного ТПК значительно упрощает технологию наплавки, так как исключаются механические заклинивания кристаллизатора при его перемещении относительно наплаваемой заготовки, проливы жидкого металла (металлической ванны) при колебаниях параметров режима наплавки, можно обеспечить лучшее формирование наплаваемого слоя.

С электротехнической точки зрения ТПК представляет собой устройство, внутри которого происходит электрошлаковый процесс с определенным распределением токов в плавильном пространстве. Само плавильное пространство ограничивается стенками кристаллизатора и поддоном, с находящимся на нем наплаваемым изделием. Естественно предположить, что с ростом

толщины наплавленного слоя должно происходить некоторое перераспределение токов относительно токоведущей секции ТПК (рис. 1). Эту ситуацию можно рассматривать и с другой стороны — на каком удалении от токоведущей секции следует располагать наплаваемую поверхность, чтобы обеспечить оптимальный нагрев зоны сплавления и хорошее формирование наплаваемого металла, что также определяется оптимальным токораспределением в шлаке. Иначе говоря, необходимо регулировать распределение рабочего тока, протекающего как вертикально вниз на из-

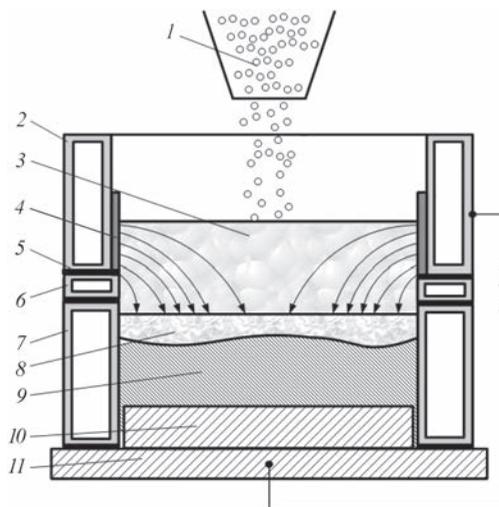


Рис. 1. Схема распределения линий электрического тока в ТПК при ЭШН дискретной присадкой: 1 — дискретная присадка; 2, 6, 7 — токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора, соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — металлическая ванна; 9 — наплавленный металл; 10 — изделие; 11 — поддон

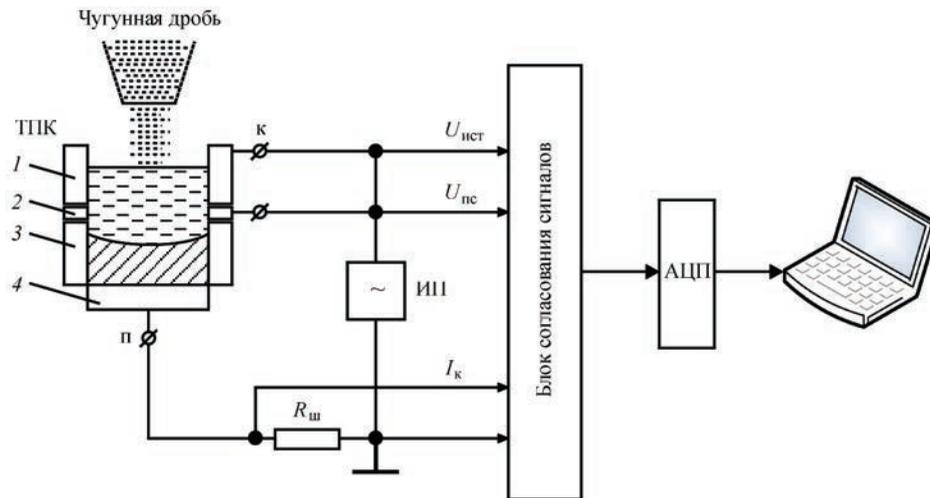


Рис. 2. Структурная схема электрических соединений при выполнении экспериментов по наплавке: К, П — клеммы подключения к токоведущей секции кристаллизатора и поддону с изделием, соответственно; ИП — источник питания;  $R_{ш}$  — измерительный токовый шунт;  $U_{ист}$ ,  $U_{пс}$ ,  $I_{к}$  — сигналы пропорциональные напряжению источника питания, разности потенциалов между промежуточной секцией и поддоном, а также току кристаллизатора (поддона), соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; 1, 2, 3 — соответственно токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора; 4 — поддон с изделием

делие, так и в горизонтальном направлении (горизонтальная составляющая). При этом обеспечивается прогрев верхних слоев шлаковой ванны.

Целью данной работы является исследование токораспределения в шлаковой ванне при изменяющейся в процессе наплавки толщине наплавляемого слоя, качественно характеризуемое изменением удельной электропроводности шлаковой ванны по ее глубине.

В качестве переплавляемого металла выбран наиболее перспективный наплавочный материал — дискретная присадка в виде колотой дроби из нелегированного чугуна диаметром примерно 2 мм.

Методика выполнения экспериментов была следующей. В ТПК диаметром 180 мм заливали расплавленный в графитовом тигле шлак (флюс АНФ-29) объемом, позволяющим обеспечить работоспособность ТПК, т. е. шлаковая ванна должна была омывать графитовую футеровку токоведущей секции на высоте примерно 20 мм. После стабилизации теплового состояния ванны и начала ее вращения в горизонтальной плоскости, благодаря особой конструкции ТПК, в нее порционно (четыре раза по 2 кг) с постепенной подачей каждой порции подавали наплавочную дробь. Расплавляясь, порция дроби превращалась в жидкий металл (металлическая ванна), который впоследствии кристаллизовался в виде наплавленного слоя толщиной примерно 12 мм. Первоначально расстояние между нижней кромкой токоведущей секции и поддоном с изделием  $h_{мв}$  составляло 85 мм, затем, после засыпки каждой порции чугунной дроби,  $h_{мв}$  уменьшалось на 12 мм. В течение всего процесса (включая периоды стабилизации шлаковой ванны после заливки рас-

плавленного шлака в кристаллизатор, изменения ее состояния при подаче дроби и вследствие роста толщины наплавляемого слоя) измеряли такие его электрические параметры как ток кристаллизатора  $I_{к}$  и напряжение источника питания  $U_{ист}$ .

Замеры и запись тока, а также напряжения проводили с помощью универсального модуля АЦП Е14-140, ноутбука Lenovo (модель Ideal Pad 4560 с 64-разрядной операционной системой) и программного обеспечения «Power Graph». На рис. 2 приведена структурная схема электрических соединений при выполнении экспериментов по наплавке. С промежуточной секции также снималось напряжение, благодаря которому контролировалась и записывалась разность потенциалов между промежуточной секцией и поддоном  $U_{пс}$ . В экспериментах в качестве источника питания использовался трансформатор А-622 М.

Для решения поставленной задачи рассчитывались следующие электрические параметры:

- проводимость шлаковой ванны  $G$  по каналу токоведущая секция кристаллизатора – поддон;
- удельная электропроводность  $\sigma$  до и после засыпки очередной порции дроби для шлаковой ванны модели конструкции замещения ТПК (рис. 3);
- условный усредненный тепловой уровень шлаковой ванны  $T^*$ .

В тепловом отношении после каждой подачи в шлаковую ванну порций присадки в ней создаются локальные температурные условия (образно говоря, «слоеный тепловой пирог»). Фиксировать эти кратковременные изменения температуры практически невозможно. Поэтому мы условно принимали расчетную усредненную (обобщенную) температуру шлака  $T^*$ , определяемую вели-

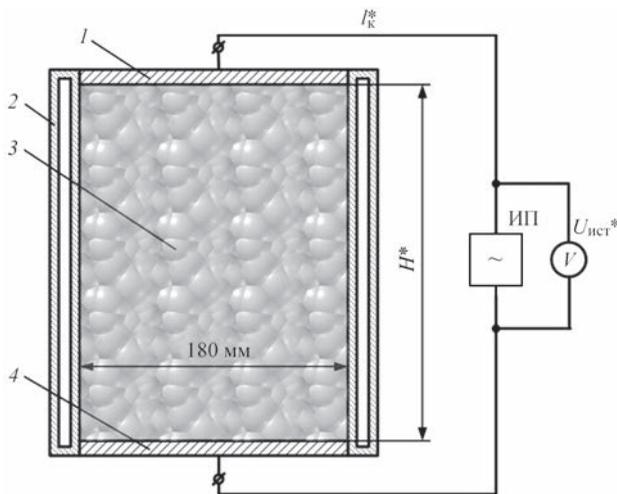


Рис. 3. Модель конструкции замещения ТПК:  $U_{ист}^*$  – напряжение источника питания «модели»;  $I_{к}^*$  – ток кристаллизатора «модели»;  $H^*$  – высота шлаковой ванны «модели»; 1 – верхняя цилиндрическая токоподводящая пластина; 2 – водоохлаждаемая изолированная секция; 3 – шлаковая ванна; 4 – нижняя цилиндрическая токоподводящая пластина

чиной его удельной электропроводности  $\sigma$  до и после подачи каждой порции присадки.

Графики изменения во времени разности потенциалов между промежуточной секцией и поддоном  $U_{пс}$ , а также проводимости шлаковой ванны  $G$ , приведены на рис. 4. Напряжение  $U_{пс}$  должно давать представление о том, как изменяется уровень металлической ванны при расплавлении дискретной присадки и считалось, что при напряжении  $U_{пс} = 10...15$  В уровень ванны приближается к нижнему краю промежуточной секции кристаллизатора и необходимо заканчивать процесс наплавки. Однако эксперимент показал, что при равномерном повышении уровня металлической ванны и приближении его к промежуточной секции (на 12 мм после засыпки каждой порции дробы) на интервале  $t_1 - t_2$  напряжение  $U_{пс}$  быстро уменьшается, затем падение  $U_{пс}$  замедляется, а после отметки времени  $t_4$  (см. рис. 4) начинает постепенно расти. При том, что напряжение  $U_{ист}$  падает (таблица) при увеличении тока  $I_{к}$  из-за недостаточно жесткой характеристики источника питания. Очевидно, что в данный момент происходит перераспределение соотношения проводимостей участков цепи между поддоном и промежуточной секцией, а также и между промежуточной секцией и токоведущей секцией. Проводимость между поддоном и промежуточной

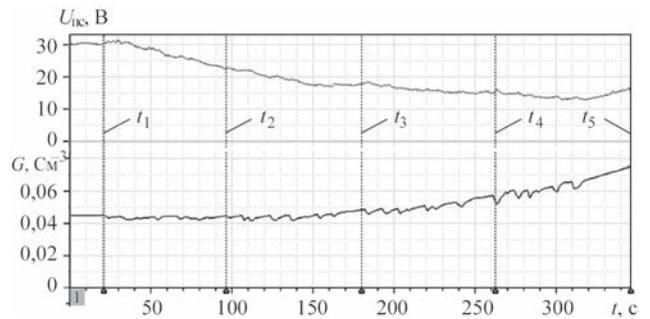


Рис. 4. Изменение во времени разности потенциалов между промежуточной секцией и поддоном  $U_{пс}$  и проводимости шлаковой ванны  $G$ ;  $t_1...t_5$  – отметки времени

секцией объективно должна увеличиваться из-за уменьшения расстояния между ними при повышении уровня металлической ванны, а проводимость между промежуточной секцией и токоведущей секцией должна уменьшаться быстрее, чем проводимость между поддоном и промежуточной секцией. Такое возможно только при резком росте температуры шлаковой ванны на интервале после отметки  $t_4$ . Электропроводность шлаковой ванны, которая вычисляется как  $G = I_{к}/U_{ист}$ , по своей сущности отражает среднюю (среднеинтегральную) характеристику шлаковой ванны. Электропроводность  $G$  на протяжении всего интервала времени от  $t_1$  до  $t_5$  увеличивалась с возрастающей скоростью (см. таблицу). Этот параметр свидетельствует о том, что энергетический уровень процесса растет, но по нему сложно оценить изменение теплового уровня.

Для оценки условного усредненного теплового уровня шлаковой ванны в течение проведения эксперимента рассчитывали удельную электропроводность  $\sigma$  до и после очередной засыпки порции дробы для шлаковой ванны модели конструкции замещения ТПК (рис. 3). По рассчитанным в моменты времени  $t_1...t_5$  значениям  $\sigma$  вычисляли условный усредненный тепловой уровень шлаковой ванны  $T^*$  по графику зависимости электропроводности флюса АНФ-29 от температуры, приведенной в работе [5]. Данная зависимость хорошо описывается выражением  $T^* = 230,6\sigma + 991,1$ . Расчет  $\sigma$  по модели конструкции замещения ТПК основан на том, что у «модели» равномерное электростатическое поле и при равенстве значений реального измеряемого напряжения источника  $U_{ист}$  и напряжения «модели»  $U_{ист}^*$ , а также при равенстве реального тока  $I_{к}$  и тока  $I_{к}^*$ , удельная проводимость  $\sigma$  модели и

**Измеряемые и расчетные показатели экспериментальной наплавки в ТПК**

Засыпка чугуной дробы, метка времени	Время $t$ , с	$h_{мв}$ , мм	$U_{пс}$ , В	$G$ , См	$I_{к}$ , А	$U_{ист}$ , В	$H^*$ , мм	$\sigma$ , См/м	$T^*$ , °С
Начало засыпки 1 порции, $t_1$	21	85	30,3	45,1	1926	42,7	166	295	1672
Начало засыпки 2 порции, $t_2$	96	73	22,5	44,5	1900	42,7	142	249	1565
Начало засыпки 3 порции, $t_3$	180	61	17,7	48,1	2020	42,0	119	224	1509
Начало засыпки 4 порции, $t_4$	262	49	15,0	56,6	2299	40,6	101	226	1512
Конец засыпки 4 порции, $t_5$	346	37	15,8	73,9	2801	37,9	91	266	1604

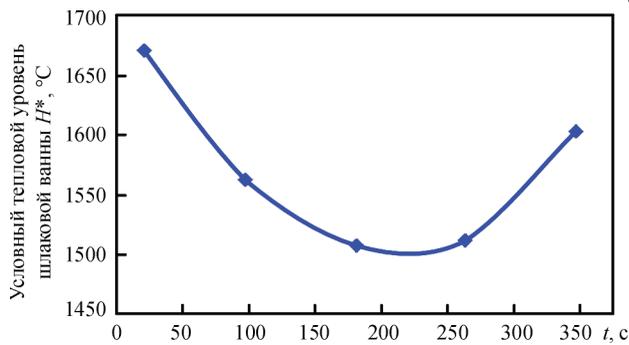


Рис. 5. Изменение условного теплового уровня шлаковой ванны в зависимости от времени при подаче порций дроби

усредненная удельная проводимость реального кристаллизатора будут равны. Для достижения указанных равенств требуется определить высоту шлаковой ванны модели конструкции замещения ТПК  $H^*$  при, соответственно, равных значениях диаметров кристаллизатора и «модели» (180 мм). Удельная электропроводность  $\sigma$  вычислялась как:  $\sigma = GH^*/(2\pi 90^2)$ . Значения  $H^*$  приведены в таблице.

Условный усредненный тепловой уровень шлаковой ванны  $H^*$  уменьшался в течение засыпки первой и второй порций дроби (рис. 5), что соответствует нашему представлению, так как каждая засыпанная порция дроби требует тепловых затрат на ее разогрев и расплавление, и если электрической мощности для этого недостаточно, то ванна охлаждается. После третьей порции дроби уровень металлической ванны поднялся до высоты, при которой ток кристаллизатора увеличился настолько, что приход и расход тепла сравнялись, температура относительно стабилизировалась. После четвертой порции дроби температура стала подниматься вверх, электропроводность шлаковой ванны стала резко увеличиваться и произошел эффект, который привел к росту  $U_{\text{пс}}$  (в интервале времени  $t_4 - t_5$ ).

Из приведенного можно сделать вывод, что наплавку следовало проводить при начальном расстоянии между нижней кромкой токоведущей секции и поддоном  $h_{\text{мв}} = 61$  мм, т. е. на таком, которое соответствовало началу засыпки третьей порции чугуна в данном эксперименте, а также при расчетном значении удельной проводимости «модели»  $\sigma = 224$  См/м. Значение удельной проводимости «модели» следует поддерживать в течение

всего процесса наплавки для стабилизации качественных характеристик наплавляемого изделия путем корректировки напряжения источника питания. Кроме того, следует дополнительно изучить возможность оценки уровня металлической ванны по перепаду напряжения между промежуточной секцией кристаллизатора и поддоном, так как смена направления изменения напряжения  $U_{\text{пс}}$  (увеличение или снижение его величины) может привести к неправильной оценке оператором ситуации во время наплавки.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что для получения качественной наплавки в стационарном кристаллизаторе слоя определенной толщины следует учитывать теплофизические характеристики применяемого флюса и положение изделия относительно токоведущей секции кристаллизатора.

### Список литературы

1. Kuskov Yu. M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*, **4**, 42–45.
2. Кусков Ю. М. (2003) Особенности электрошлаковой наплавки зернистой присадкой в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*, **9**, 42–47.
3. Кусков Ю. М., Гордань Г. И., Богайчук И. Л., Кайда Т. В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 34–37.
4. Кусков Ю. М. (2018) Влияние состава флюса на процесс торцевой электрошлаковой наплавки с раздельной подачей присадочного материала. *Там же*, **1**, 44–49.
5. Латаш Ю. В., Фетисова Т. Я., Воронин А. Е. (1985) Исследование электропроводности и вязкости шлаков (флюсов) системы  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , применяемой в электрошлаковой технологии. Сообщение 3. *Специальная электрометаллургия*, **8**, 11–17.

### References

1. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42-45.
2. Kuskov, Yu.M. (2003) Peculiarities of electroslag surfacing with granular filler material in current-supplying mould. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 42-47 [in Russian].
3. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L., Kajda, T.V. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 30-33.
4. Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *Ibid.*, **1**, 33-37.
5. Latash, Yu.V., Fetisova, T.Ya., Voronin, A.E. (1985) Investigation of electric conductivity and toughness of slags (fluxes) of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system used in electroslag technology: Information. *Spetsiektrometallurgiya*, **8**, 11-17 [in Russian].

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ШАРІВ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ В СТАЦІОНАРНОМУ СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВІЙОВ, І. П. ЛЕНТЮГОВ, В. О. ЖДАНОВ

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

Вивчено характер зміни електротехнічних параметрів процесу плавлення дискретної присадки при її подачі порціями та зміни товщини наплавленого металу в стаціонарному струмопідвідному кристаллизаторі. Встановлено, що на процес плавлення в шлаковій ванні впливають початкові значення глибини та питомої електропровідності шлакової ванни. Введено поняття усередненого теплового рівня шлакової ванни, що характеризує зміну фізичних властивостей і теплового

стану ванни в результаті введення в неї порцій дискретної присадки та дозволяє оптимізувати початкове положення наплавленної поверхні щодо струмоведучої секції кристалізатора. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова*: електрошлакове наплавлення, стаціонарний струмопідвідний кристалізатор, товщина наплавленого металу, глибина шлакової ванни

## ELECTROSLAG SURFACING OF LAYERS OF DIFFERENT THICKNESSES IN STATIONARY CURRENT-SUPPLYING MOULD

YU. M. KUSKOV, V.G. SOLOVIEV, I.P. LENTYUGOV, V.A. ZHDANOV

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Studied was a nature of change of electro-technical parameters of process of discrete filler melting in its portion feed in a stationary current-supplying mould. It is determined that the process of melting in a slag pool is effected by initial values of depth and specific electric conductance of the slag pool. Initially set average thermal level of the slag pool and stabilization of the process can be provided by means of correction of power source voltage. The method was proposed for selection of optimum position in the current-supplying mould of surface of part being deposited depending on used working flux. Ref. 5, Tabl. 1, Fig. 5.

*Keywords*: electroslag surfacing, stationary current-supplying mould, deposited metal thickness, slag pool depth

Поступила в редакцію 27.06.2018

### **Міжнародна конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики»**

10-14 вересня 2018 р. в Одесі в готелі «Курортний» відбулась XXII міжнародна конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», яка була організована Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, Українським товариством неруйнівного контролю і технічної діагностики та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». Інформаційну підтримку конференції надали журнали «Автоматическая сварка» та «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

В роботі конференції взяли участь біля 150 учених та спеціалістів з України, Німеччини, Франції, Великої Британії, США, Грузії та Росії. Було заслухано 51 доповідь, 15 коротких повідомлень, проведені дискусії з проблемних питань неруйнівного контролю. Одночасно працювала велика виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики, на якій 10 провідних підприємств України демонстрували свої найкращі розробки останніх років та пропонували передові технології.

Генеральним спонсором конференції був Український НДІ неруйнівного контролю. УкрНДІНК разом з НВФ «Ультракон-сервіс» та НВФ «Промприлад» є провідним в Україні виробником дефектоскопів та автоматизованих установок для ультразвукового, вихрострумове, магнітного контролю, товщинометрії, твердометрії, акустичної емісії та ін.

#### **Спонсори конференції:**

- НВП «ІНТРОНСЕТ» (Київ) — прилади для технічного та екологічного контролю, обстеження будинків та споруд, ремонтні матеріали та інструменти.

- ТОВ «Хімлаборреактив» (Бровари, Київська обл.) — багатопрофільна компанія, що комплексно оснащує лабораторії (обладнання, меблі, реактиви, посуд і т. п.). Департамент неруйнівного контролю пропонує лінійку найсучасніших дефектоскопів для ультразвукового і вихрострумове контролю та аналізу матеріалів і захисних покриттів.

- компанія ОНІКО (Київ) — багатопрофільна компанія, що пропонує медичну продукцію, обладнання для водопостачання, тренажери, та учбові стимулятори та засоби неруйнівного контролю провідних світових виробників.

- компанія УКРІНТЕХ (Харків) — виробництво і поставки випробувального обладнання для неруйнівного контролю, металографії, вібродіагностики.

Окрасою конференції була виставка засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики. Оргкомітету вдалося зібрати в одному місці всіх основних виробників і постачальників засобів неруйнівного контролю в Україні. На десяти стендах було представлено обладнання і матеріали для найпристосованіших фахівців.

Крім спонсорів, що названі вище, у виставці також взяли участь НВФ «Ультракон», НВФ «Діагностичні прилади», ТОВ «Харків-прилад», НВЦ «Діагностика і контроль», НВЦ «Промтехнологія», NOVOTEST, ТОВ «Мелітек-Україна».

Оргкомітет конференції НКТД планує провести наступну конференцію в Одесі у 2020 р.