

УДК.669.017:621.78

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДИФИКАТОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ КОКИЛЬНОМ ЛИТЬЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ТРАНСПОРТНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

С.Н. Жеребцов<sup>1</sup>, Е.А. Чернышов<sup>1</sup>, А.А. Александров<sup>2</sup>, В.И. Гурдин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет (НГТУ)»  
им. Р.Е. Алексеева, Россия, г. Нижний Новгород  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований, теоретических разработок и практических испытаний изделий, полученных с совместным использованием процессов модифицирования и технологии высокотемпературной обработки расплава никелевых сплавов при электрошлаковом кокильном литье, подтверждающие эффективность применения разработанных технологий для повышения физико-механических свойств изделий и служебных характеристик металла.

**Ключевые слова:** электрошлаковое кокильное литье, модифицирование, жидкий металл, шлак, технологические параметры, физико-механические свойства, никелевый сплав.

### Введение

Повышение эффективности и надежности работы изделий, применяемых в авиации, космонавтике, автомобилестроении, теплоэнергетике, в газовом хозяйстве во многом определяется достигнутым уровнем служебных характеристик литых изделий из никелевых жаропрочных сплавов. Прогресс в этой области связан с использованием технологических приемов физического и химического воздействия на жидкий металл, в процессе плавки, разлива, сварки. Достижение высокого уровня физико-механических свойств металла и производства годных изделий высокого качества требует решения комплекса задач практического и теоретического плана, связанного с выплавкой и формированием требуемой структуры отливок. Существенные резервы управления структурой и служебными свойствами отливок открывает использование методов энергетического воздействия на жидкий металл, среди которых важное место занимают модифицирование ультрадисперсными порошками (УДП) и высокотемпературная обработка расплавов (ВТОР).

**Особо актуальной** представляется проблема изготовления, высококачественных заготовок с использованием энерго- и ресурсосберегающих технологий, среди которых весьма заметную роль в последние годы играют электрошлаковые технологические процессы, такие как электрошлаковый переплав,

электрошлаковое литье, электрошлаковое кокильное литье (ЭШКЛ) и электрошлаковая сварка. Несмотря на явные преимущества электрошлаковых технологий, разработанных в Институте электросварки им. Е.О. Патона, АН Украины, г. Киев, информация о которых широко опубликована, литой электрошлаковый металл заготовок из таких материалов по механическим свойствам и служебным характеристикам изделий обычно уступает поковкам из металла: вакуумно-дугового, вакуумно-индукционного (ВИП) переплавов.

Реализация преимуществ электрошлаковых технологий при производстве таких заготовок связана, прежде всего, с решением проблемы повышения свойств литого электрошлакового металла до уровня получаемого обработкой давлением. Достижение более высоких показателей свойств литого металла возможно в основном по двум направлениям: модифицированием его структуры путем введения ультрадисперсных порошковых комплексов (УДПК) в процессе кристаллизации и повышением металлургической чистоты расплава в процессе переплава расходуемого электрода в плавильной емкости, а также практическим применением в производственных условиях технологии ВТОР.

Электрошлаковому переплаву подвергали никелевые жаропрочные литейные сплавы типа: ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК, во время переплава вводили модификаторы

различного химического состава ( $\text{TiCN-Ti-Cr}$ ,  $\text{TiCN-Ti-Ni}$ ,  $\text{TiCN-Ti-Y}$ ,  $\text{TiCN-Ti-Mo}$ ,  $\text{TiCN-Ti-Va}$ , в статье представлены результаты исследования с модификатором  $\text{Ti}(\text{C}_x\text{N}_y)\text{-Ti}$ . В процессе ЭШКЛ производили технологический перегрев расплавленного металла в плавильной емкости – для проверки нашего предположения о положительном влиянии технологии ВТОР совмещенной с процессом модифицирования жидкого металла на структуру и физико-механические свойства отливаемого изделия [1, 3].

Металл плавил и разливали в установке электрошлакового литья А550-У, УШ-148 варьируя температуру введения добавки,

состав модификатора, время выдержки, температуру жидкого металла, шлака, силу тока, напряжение в процессе переплава, температуру охлаждающей жидкости и т.д.

На рисунке 1 приведена реальная схема процесса переплава расходуемого электрода из сплава ЖС6-У под слоем защитного синтетического флюса марки  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  в охлаждаемой автогарнисажной плавильной емкости [1, 2, 3]. Температура нагрева жидкого металла достигала от  $1900\text{ }^\circ\text{C}$  до  $2040\text{ }^\circ\text{C}$ , а жидкого флюса соответственно от  $2150\text{ }^\circ\text{C}$  до  $2320\text{ }^\circ\text{C}$ .

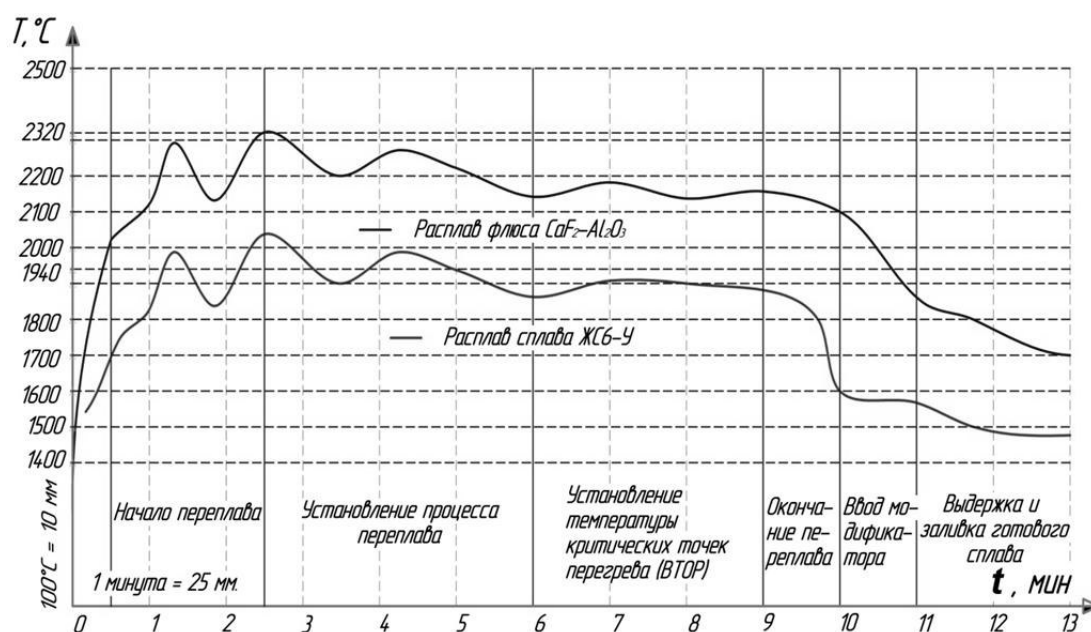


Рис. 1 Температурно-временная зависимость процесса ЭШКЛ+ВТОР расходуемого электрода из сплава ЖС6-У в плавильной емкости

Контроль и запись токовых режимов электрошлакового переплава расходуемого электрода в плавильной емкости производились с помощью электронного потенциометра КСП-4, контроль скорости плавления электрода осуществляется с помощью датчика веса в комплекте с самописцем ПСР-1. Температура охлаждающей жидкости (вода) на входе и выходе из поддона плавильной емкости контролировалась электронным автоматическим многоточечным потенциометром ЭПР-09РМЗ. Для прямого замера температуры жидкого металла и шлака в плавильной емкости на протяжении всего процесса переплава расходуемого электрода применялась вольфрам-рениевая

термопара типа ВР5(20)5 в защитном корпусе из тугоплавкого металла.

Модифицирование после ВТОР с введением УДПК, разработанного на базе  $\text{TiCN-Ti}$  в диапазоне температур при  $1450\text{-}1470\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1580\text{-}1600\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1720\text{-}1740\text{ }^\circ\text{C}$ , потребовало применения технологии подстуживания жидкого металла, для повышения эффекта модифицирования за счет снижения продолжительности времени выдержки от момента введения УДПК в жидкий металл, с последующей заливкой в кокиль и до начала процесса кристаллизации сплава в литейной форме [3, 4].

Перевод расплава никелевых сплавов в равновесное состояние при воздействии высокотемпературной обработки расплава осуществляют перегревом выше второй

критической температуры  $t_{к2}$  1830 °С (для ЖСЗ-ДК и ЖС6-У), и 1800 °С для ЖС6-К. Необходимую температуру перегрева расплава ЖСЗ-ДК, ЖС6-К, ЖС6-У для перевода его в равновесное состояние определили по изменению кинематической вязкости и удельного сопротивления в жидком состоянии [6, 7].

На поллитерах структурно-чувствительных свойств никелевого сплава ЖСЗ-ДК можно выделить два температурных интервала, в которых, по-видимому, происходят интенсивные изменения структуры расплава. В низкотемпературной области 1550-1650 °С аномальный характер изменения свойств связан с разрушением неравновесных группировок атомов, соответствующих по составу и строению

интерметаллидной  $\gamma'$ -фазе, а в интервале температур 1780-1830 °С осуществляются полная диссоциация и растворение тугоплавких соединений находящихся в расплаве.

С учетом результатов опытов был выбран следующий температурный режим плавки и модифицирования: перегрев до 1840-1850 °С, выдержка 5-10 мин; температура введения УДПК не должна превышать 1700 °С. Оптимальную температуру введения модификатора установили по изменению механических свойств образцов из сплава ЖСЗ-ДК, полученных с использованием технологии электрошлакового кокильного литья (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние температуры введения модификатора после ВТОР при ЭШКЛ (1830°С) на механические свойства сплава ЖСЗ-ДК

Температура введения, Т °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1570	1086/1074/1071	793/820/791	18,9/14,0/18,8	21,2/20,0/22,4
Среднее	1077	801	17,2	21,2
1610	1056/1075/1036	802/804/794	18,8/18,0/14,8	20,8/20,1/20,5
Среднее	1055	800	17,2	20,4
1650	1162/1162/1152	843/843/839	16,0/16,8/16,0	19,7/20,4/18,1
Среднее	1158	841	16,3	19,4
Паспорт	900	760	14,0	16,0

В качестве оптимизируемых технологических параметров ЭШКЛ были взяты: температура перегрева расплава при ВТОР, температура ввода УДПК в расплав, температура заливки, время выдержки от момента ввода модификатора до заливки и количество вводимых УДПК. В качестве функций сравнения использовали относительное удлинение, предел прочности, ударную вязкость и длительную жаропрочность исследуемых сплавов ЖС6-У, ЖСЗ-ДК, ЖС6-К, согласно ОСТ 1 90126-85.

Механические свойства испытанных образцов, вырезанных из отливок, свидетельствуют о том, что совмещение ВТОР с модифицированием и принудительным охлаждением расплава, позволяет увеличить прочность изделия на 220-250 МПа, при росте пластичности примерно в два раза.

Следует отметить, что при последовательном увеличении нагрузки на испытуемый образец, сопротивление разрушению модифицированного сплава повышается. Это может быть связано с диссипацией энергии на блоках структуры,

окружающей модифицированные карбиды, а также меньшим углом «разориентировки» самих зерен модифицированного сплава [4].

Исследование длительной прочности на образцах, вырезанных из отливок сплава ЖС6-У, указывает, что показатель длительной прочности у модифицированного сплава выше на 80÷140 МПа, чем немодифицированного. Образцы из модифицированного сплава ЖСЗ-ДК после ЭШКЛ по сравнению с ВИП выдерживают нагрузку 700-920 МПа при 700 °С, при длительности испытания более 150-265 ч (таблица 2). Выполненные исследования наглядно показывают, что ЭШКЛ по сравнению с ВИП более прогрессивная технология переплава высоколегированных никелевых сплавов.

Свойства модифицированного сплава ЖС6-У, подвергнутого ВТОР при ЭШКЛ, верхняя критическая точка для сплава ЖС6-У составляет 1830 °С, а нижняя 1650 °С. Продолжительность выдержки расплава при 1830 °С принимали равной 10 мин. Модификаторы вводили при 1650 °С. Исследование механических свойств

образцов показало, что свойства модифицированного сплава улучшились по сравнению со сплавом после ВТОР без

модифицирования. При этом повысились:  $\sigma_B$  – на 10-15%,  $\delta$  – на 35-47%,  $\psi$  – на 45-58%.

Таблица 2 – Длительная прочность образцов модифицированного сплава ЖС-ЗДК, вырезанных отливок ( $t_{исп}$ -700°C)

Переплав	Нагрузка $\sigma$ , МПа	Время до разрушения, ч	$\delta$ , %	$\psi$ , %
ВИП	680/720/740	100/106/97	4,7	5,6
ВИП	688/720/740/760/780	100/100/100/100/168	3,1	3,7
ВИП	680/740	100/93	4,3	6,8
ЭШКЛ	870/920	265/155	6,8	7,5
ЭШКЛ	880/910	240/180	5,4	6,3
ЭШКЛ	680/700	150/130	3,4	5,1
ВИП	820/800	130/145	5,2	4,0

Размер макрозерна в отливках из модифицированного сплава при ЭШКЛ + ВТОР составил в среднем 0,7-1,2 мм, карбиды приобрели компактную форму, их средний размер составил 3-5 мкм. Наилучшие сочетания структуры и свойств сплавов ЖС6-К, ЖС6-У получены при введении УДП комплекса при 1580°C и выдержке 5 мин с последующей разливкой при 1490-1510 °С.

Циклическая устойчивость полученных различными способами производства ВИП и ЭШКЛ образцов из модифицированного сплава ЖС6-У при 20 °С, при испытании на резонансной частоте и базе  $2 \cdot 10^7$  циклов, увеличивается от 166 МПа до 200 МПа.

Исследование длительной прочности образцов модифицированного сплава ЖС6-У при различных температурах и нагрузках показало, что при 100-часовой нагрузке на образец она может быть увеличена до 30 МПа. По сертификату завода изготовителя  $\sigma_B=1000-1050$  МПа;  $\delta = 3-5\%$ ;  $\psi = 4-8\%$ ;  $\sigma_{100}^{1000} = 170$  МПа. Это связано с тем, что детали машин (энергетические установки, лопатки, ротора газотурбинных двигателей, изделия «Сердечник рогообразный» и др.), работающих в условиях высоких температур и агрессивных газовых средах, воспринимают большие знакопеременные механические нагрузки.

Необходимо отметить, что особенности структуры жаропрочных никелевых сплавов, отлитых с применением ВТОР, требуют изменения режимов термической обработки изделий для получения максимальной жаропрочности: нагрев до температуры растворения 10%  $\gamma'$ -фазы с охлаждением на воздухе и старения при температуре начала растворения  $\gamma'$ -фазы. Отмечено, что повышение скорости охлаждения металла отливки способствует измельчению карбидов

MeC при кристаллизации и  $\gamma'$ -фазы при распаде  $\gamma$ -фазы в интервале температур 1400-1500°C.

Для отработки комбинированной технологии ВТОР и модифицирования был проведен ряд опытных плавов сплавов ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК и т.д. В результате были определены рациональные режимы получения отливок, позволяющие повысить физико-механические свойства металла за счет улучшения строения карбидной и  $\gamma'$ -фазы путем увеличения скорости процесса направленной кристаллизации при охлаждении.

Варьирование параметров процесса разливки позволило оценить влияние температуры введения модификатора и его состава на механические свойства сплава. Наиболее высокие и стабильные свойства получены при модифицировании 0,025% TiCN-Ti от массы заливаемого металла, при температуре введения добавки 1650-1670 °С [1, 4, 5, 8].

Был принят следующий режим плавки и разливки сплава ЖС6-У в изделие «Сердечник рогообразный»: ВТОР при 1740 °С, выдержка 10-20 мин., введение модификатора при 1670 °С, температура заливки 1530 °С [3, 4].

Следует отметить, что общий уровень механических свойств всех образцов из сплавов ЖС6-У после ВТОР и модифицирования выше по сравнению с сертификатом ОСТ 1 90126-85:  $\sigma_B$  – на 140-320 МПа,  $\delta\%$  – в 2-4 раза, причем он достигнут без посторонних кристаллов, образующихся при охлаждении.

В процессе выполнения работы был широко опробован технологический процесс объемного модифицирования сплавов ЖС 6-У, ВЖЛ12-У, ЖС3-ДК, позволивший увеличивать их пластичность в 1,5-2 раза и

поднять предел циклической выносливости на 25-40 % [1, 4, 6].

### Выводы

На основе проведенных экспериментальных плавов с заливкой образцов и их испытаний определены составы модифицирующих комплексов, применение которых оказывает положительное влияние на увеличение физико-механических свойств изучаемых жаропрочных литейных никелевых сплавов.

Получены сравнительные характеристики и результаты испытаний физико-механических свойств и служебных характеристик изделий, произведенных ВИП и ЭШКЛ с применением комбинированной технологии модифицирования и ВТОР, а также определены реальные параметры прямых замеров температуры жидкого металла и шлака при переплаве ряда жаропрочных никелевых сплавов в автогарнисажной плавильной емкости на протяжении всего технологического процесса изготовления изделий ЭШКЛ.

Практическое применение ВТОР совместно с модифицированием позволило получить стабильные служебные свойства отливок, а также повысить механические свойства сплавов выше уровня механических свойств серийных сплавов указанных в сертификатах на металлы, поставляемые заводами изготовителями.

### Библиографический список

1. Жеребцов, С.Н. Применение метода высокотемпературной обработки жаропрочного сплава при литье изделия «Сердечник рогообразный»./ С.Н. Жеребцов // Литейщик России. – 2005 – № 7. – С. 37-39.
2. Жеребцов, С.Н. Применение технологии электрошлакового переплава для производства изделия из хромоникелевых сплавов / С.Н. Жеребцов // Технология машиностроения. – 2006. – № 5. – С 12-14.
3. Жеребцов, С.Н. Применение наноматериалов и высокотемпературной обработки никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье : дис. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2006. – 213 с.
4. Ларинов, В.Н. Применение высокотемпературной обработки расплава при монокристалльном литье лопаток турбин на установке УВНК-8П / Ларинов, В.Н. // М.: Авиационная промышленность. – 1989. – Приложение № 2. – С. 30-34.
5. Еремин, Е.Н. Повышение качества литого металла при электрошлаковом переплаве жаропрочных никелевых сплавов./

Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов, В.Г. Радченко // М.: Известия Вузов. Черная металлургия. 2003, – № 8 – С. 15-18.

6. Колотухин, Э.В. Совершенствование технологии выплавки и повышение качества жаропрочных сплавов на основе исследования их удельного электросопротивления: дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / Б.В. Николаев // – Екатеринбург, 1992. – 122 с.

7. Барышев, Е.Е. Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии./ Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова // УрО РАН – Екатеринбург, 2010. – 198 с.

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF IMPACT MODIFIERS AT ELECTROSLAG CHILL CASTING NIKILEVYH HEAT-RESISTANT ALLOYS THE TRANSPORT ENGINEERING

S.N. Zherebtsov, E.A. Chernyshov,  
A.A. Aleksandrov, V.I. Gurdin

**Abstract.** The results of the research, theoretical development and practical tests of products derived from the process of sharing and modification of high-temperature melt processing techniques (second) nickel alloys at electroslag chill casting, confirming the effectiveness of the technologies developed for improving the physical and mechanical properties of the product and service characteristics of the metal.

**Keywords:** electroslag chill casting, modification, liquid metal, slag, technological parameters, mechanical properties, nickel alloy.

### References

1. Zherebtsov S.N. Application of high temperature treatment of heat-resistant alloy for casting products «horn-shaped core» [Primenenie metoda vysokotemperaturnoj obrabotki zharoprochnogo splava pri lit'e izdeliya "Serdechnik rogoobraznyj"]. *Litejshchik Rossii*, 2005, no 7. pp. 37-39.
2. Zherebtsov S.N. The use of electro-slag remelting technology for the production of products made of chromium-nickel alloy [Primenenie tekhnologii ehlektroshlakovogo pereplava dlya proizvodstva izdeliya iz hromonikelevykh splavov]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2006, no 5. pp 12-14.
3. Zherebtsov S.N. *The use of nanomaterials and high-temperature processing nickelchromoviy alloys at electroslag casting: dis. cand. tehn. sciences* [Primenenie nanomaterialov i vysokotemperaturnoj obrabotki nikel'hromoviy splavov pri ehlektroshlakovom lit'e: dis. kand. tekhn. nauk]. Novokuzneck, 2006. 213 p.
4. Larinov V.N. *The use of high-temperature melt processing at single-crystal casting of turbine blades*

at the facility UVNK-8P [Primenenie vysokotemperaturnoj obrabotki rasplava pri monokristal'nom lit'e lopatok turbin na ustanovke UVNK-8P]. Moscow, Aviacionnaya promyshlennost'. 1989. Prilozhenie № 2. pp. 30 – 34.

5. Eremin E.N., Zherebcov S.N., Radchenko V.G. *Improving the quality of the cast metal at electroslag remelting heat-resistant nickel alloys* [Povyshenie kachestva litogo metalla pri ehlektroshlakovom pereplave zharoprochnyh nikelevyh splavov]. Moscow, Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya. 2003, no 8. pp. 15-18.

6. Kolotuhin E.H.V. *Improving the technology of smelting and improving the quality of high-temperature alloys on the basis of their electrical resistivity: dis. cand. tehn. sciences* [Sovershenstvovanie tekhnologii vyplavki i povyshenie kachestva zharoprochnyh splavov na osnove issledovaniya ih udel'nogo ehlektrosoprotivleniya: dis. kand. tekhn. Nauk]. Sverdlovsk, 1990. 150 p.

7. Baryshev E.E., Tyagunov A.G., Stepanova N.N. *Impact melt structure on the properties of heat-resistant nickel alloys in the solid state* [Vliyaniye struktury rasplava na svoystva zharoprochnyh nikelevyh splavov v tverdom sostoyanii]. UrO RAN, Ekaterinburg, 2010. 198 p.

*Жеребцов Сергей Николаевич (Россия, г. Нижний Новгород) – кандидат технических наук, доцент, доцент Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: s.n.zherebtzov@mail.ru).*

*Чернышов Евгений Александрович (Россия, г. Нижний Новгород) – доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета*

*им. П.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24).*

*Александров Александр Александрович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: omsk-aaa@rambler.ru).*

*Гурдин Виктор Иванович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).*

*Zherebtsov Sergey Nikolaevich (Russian Federation, Nizhny Novgorod) – candidate of technical sciences, the associate professor, the associate professor of the Nizhny Novgorod state technical university of P. E. Alekseeva (Nizhny Novgorod, Minin St., 24, e-mail: s.n.zherebtzov@mail.ru).*

*Chernyshov Evgeny Aleksandrovich (Russian Federation, Nizhny Novgorod) – doctor of technical sciences, professor, professor of the Nizhny Novgorod state technical university of P. E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Minin St., 24).*

*Alexandrov Alexander Aleksandrovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor, professor The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: omsk-aaa@rambler.ru).*

*Gurdin Victor Ivanovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor, professor The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira Ave., 5).*

УДК 621.879.48

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ ГРУНТОВ РОТОРНО-ДИСКОВЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ПОД ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Р.А. Кабашев<sup>1</sup>, С.Дж. Тургумбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казахская автомобильно-дорожная академия им.Л.Б. Гончарова, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан.

**Аннотация.** В результате проведенных экспериментальных исследований получены закономерности влияния гидростатического давления на процесс копания грунтов ножами роторно-дискового рабочего органа. Установлено, что для связных грунтов сопротивление копанию грунта ножами роторно-дискового рабочего органа увеличивается с ростом значения гидростатического давления (глубины погружения рабочего органа). Приведена конструкция стенда физического моделирования для изучения процесса копания грунтов ножами роторно-дискового рабочего органа под гидростатическим давлением. Глубина погружения рабочего органа в жидкую среду моделировалась созданием соответствующего гидростатического давления в герметичном корпусе стенда. На основе тензометрических записей получены значения касательной составляющей усилий копания грунтов и значения тягового сопротивления копания траншеи под гидростатическим давлением.