

УДК 621.891

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.85845

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

© Н. Ф. Дмитриченко, А. А. Тмаргазин, Е. П. Пугачевская

### INVESTIGATION OF PROPERTIES OF SURFACES, RECOVERED BY ELECTRIC-ARC COATINGS

© N. Dmitrichenko, A. Tamargazin, E. Pugachevskaya

*Рассмотрены физико-механические свойства восстановленных поверхностей деталей электродуговыми покрытиями с позиции влияния на них технологических параметров процесса нанесения покрытий. В результате проведенных экспериментов установлены зависимости прочности сцепления, пористости и газопроницаемости покрытий от технологических режимов их нанесения (тока и напряжения дуги, дистанции напыления, величины давления сжатого воздуха)*

**Ключевые слова:** электродуговое покрытие, качество, пористость, прочность сцепления, дистанция напыления, свойство поверхности

*Physical and mechanical properties of the recovered surfaces of the machine parts by electric-arc coating are considered from position of influence of technological parameters of coating process. Dependences of adhesion strength, porosity and gas permeability of coatings from the technological coating modes (current voltage of arc, spraying distance, pressure of the compressed air) are set as a result of the conducted experiments*

**Keywords:** electric-arc coating, quality, porosity, adhesion strength, spraying distance, surface property

#### 1. Введение

Адгезионные и когезионные характеристики покрытия определяют его работоспособность. Сцепление распыляемых частиц материала покрытия с материалом восстанавливаемой поверхности происходит за счет механического сцепления (анкерного зацепления, заклинивания), возможной адгезии, сил усадки и частичного приваривания. Соединение напыленного слоя с восстанавливаемой поверхностью происходит в основном путем механического сцепления распыляемых частиц с неровностями шероховатой поверхности восстанавливаемой детали. Актуальность данной работы состоит в исследовании свойств восстановленных поверхностей, а именно в определении значений прочности сцепления электродуговых покрытий с восстановленной поверхностью.

#### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Многочисленные исследования работоспособности деталей с покрытиями показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и восстанавливаемой поверхностью. Другими словами, одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик восстанавливаемых деталей электродуговыми покрытиями является прочность сцепления покрытия с восстанавливаемой поверхностью – единственный критерий, который используют в практике восстановления деталей покрытиями [1, 2]. Поэтому вопрос исследования механических свойств электродуговых покрытий, значений внутренних напряжений растяжения, зависимости влияния дистанции напыления

на растягивающие остаточные напряжения до сих пор является актуальным.

#### 3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования – свойства поверхностей, восстановленных электродуговыми покрытиями.

Цель исследования – проведение испытаний покрытий на прочность их сцепления с материалом восстанавливаемой поверхности при распылении материала покрытий продуктами сгорания пропановоздушной смеси.

Задачи исследования – установление зависимостей влияния дистанции напыления на растягивающие остаточные напряжения, исследование оптимальной толщины покрытия.

#### 4. Методика исследования

Однако не всегда имеется возможность обеспечить необходимую скорость относительного перемещения электродугового аппарата и восстанавливаемой поверхности детали [3]. Поэтому на коротких дистанциях напыления  $L_m=80-90$  мм целесообразно использовать технологический прием, который позволяет значительно снизить пористость покрытия, наносимого за один проход при минимальной скорости перемещения электродугового аппарата относительно восстанавливаемой поверхности. Технологический прием заключается в наклоне оси металовоздушной струи к восстанавливаемой поверхности детали под углом  $\alpha=55-75^\circ$ , а к направлению перемещения электродугового аппарата – под углом  $\beta=40-60^\circ$ . При использовании предлагаемого технологического приема отраженный газовый поток рас-

текается не вдоль восстанавливаемой поверхности во все стороны, а преимущественно в сторону, противоположную наклону оси распылительной головки. В результате частицы материала покрытия, движущиеся вместе с этим потоком, оседают на неровности восстанавливаемой поверхности, а не на микровыступы, расположенные по ходу перемещения электродугового аппарата (обеспечивается углом  $\beta$ ) и на следующей полосе напыления (обеспечивается углом  $\alpha$ ).

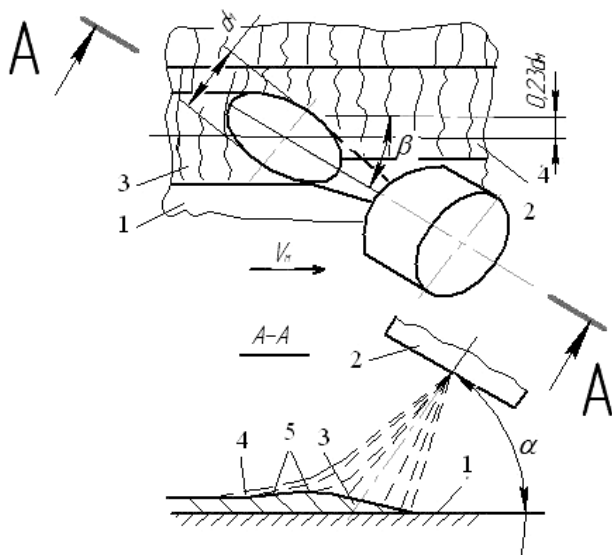


Рис. 1. Технологический прием восстановления поверхностей нанесением покрытий на коротких дистанциях путем наклона оси металло-воздушной струи к восстанавливаемой поверхности детали под углом  $\alpha$ , а к направлению перемещения электродугового аппарата – под углом  $\beta$ : 1 – подложка; 2 – распылительная головка электродугового аппарата; 3 – полоса напыления; 4 – предыдущая полоса напыления; 5 – «наросты» на поверхности покрытия

**5. Результаты исследований прочности сцепления электродуговых покрытий с восстанавливаемой поверхностью экспериментальных образцов, влияние температуры распыляемых частиц на проникновение в восстанавливаемую поверхность детали.**

В табл. 1 приведены значения прочности сцепления электродуговых покрытий с восстановленной поверхностью и величина нагрузки отрыва штифта от шайбы, которые определялись штифтовым методом. А на рис. 2 представлены кривые нагрузки (1, 2) экспериментальных образцов с электродуговыми покрытиями, полученные при испытании покрытий на прочность их сцепления с материалом восстанавливаемой поверхности при распылении материала покрытия продуктами сгорания пропано-воздушной смеси (кривая 1) и сжатым воздухом (кривая 2).

Полученные данные о прочности сцепления напыленных электродуговых покрытий с восстанавливаемой поверхностью экспериментальных образцов согласуются с данными, полученными другими исследователями [4].

При испытании образцов, поверхности которых восстановлены путем распыления проволоочных сталей продуктами сгорания пропано-воздушной

смеси, кривая нагрузки 1 получилась более пологая, что говорит о пластичности этого покрытия.

Таблица 1  
Прочность сцепления электродуговых покрытий с восстанавливаемой поверхностью экспериментальных образцов

Номер образца	Нанесение покрытия при распылении			
	воздухом		пропано-воздушной смесью	
	F, Н	$\sigma_{ср}$ МПа	F, Н	$\sigma_{ср}$ МПа
1	469	37,4	595	47,4
2	462	36,8	570	45,4
3	481	38,3	595	47,4
4	456	36,3	634	50,5
5	453	36,1	623	49,6
Среднее значение	464	36,9±0,6	603	47,5±0,9

В случае покрытия, полученного при электродуговом распылении материала покрытия сжатым воздухом – кривая 2, отрыв штифта происходит по всей поверхности торца штифта одновременно. Это приводит к более резкому падению нагрузки.

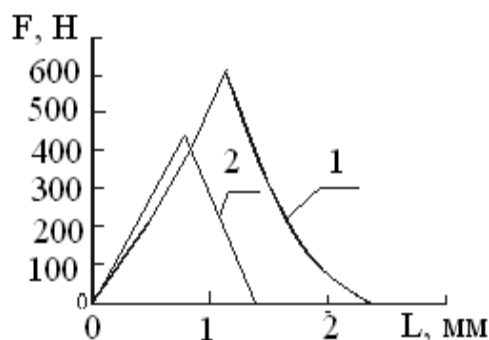


Рис. 2. Кривые нагрузки при распылении материала покрытия: 1 – продуктами сгорания пропано-воздушной смеси; 2 – воздухом

Как следует из табл. 1 и рис. 1 прочность сцепления покрытия, полученного при распылении проволоочных сталей продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, с материалом восстанавливаемой поверхности экспериментальных образцов в 1,4–1,5 раза превосходит аналогичные покрытия, полученные при распылении материала покрытия сжатым воздухом. Такие результаты являются следствием того, что частицы материала, распыляемого продуктами сгорания пропано-воздушной смеси значительно меньше подвержены охлаждению распыляемым потоком, и дополнительно подогреваются пламенем горячей струи пропано-воздушной смеси. Это ведет к снижению внутренних напряжений в отдельных частицах и в покрытии в целом. Полет частиц при распылении продуктами сгорания пропано-воздушной смеси происходит в защитной атмосфере, что обеспечивает сверхтонкую пленку окислов на поверхности частиц. Поэтому частицы попадают на восстанавливаемую поверхность с более высокой температурой и с тон-

кой оболочкой окислов, что обуславливает появление не только механического зацепления частиц материала покрытия с материалом восстанавливаемой поверхности, но и микроприваривания частиц к ней. Более высокая температура частиц, распыляемых продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, обеспечивает лучшее их проникновение в шероховатую восстанавливаемую поверхность детали. При распылении проволоки продуктами сгорания пропано-воздушной смеси образующиеся частицы более мелкие, поэтому они заземляются в шероховатой восстанавливаемой поверхности экспериментального образца. При этом прочность сцепления покрытия с восстанавливаемой поверхностью увеличивается.

Обобщая результаты исследований прочности сцепления покрытий с восстановленной поверхностью в зависимости от режимов электродугового напыления следует отметить, что адгезия покрытия с увеличением скорости истечения струи продуктов сгорания пропано-воздушной смеси, и, следовательно, скорости распыляемых частиц материала покрытия, повышается (рис. 3).

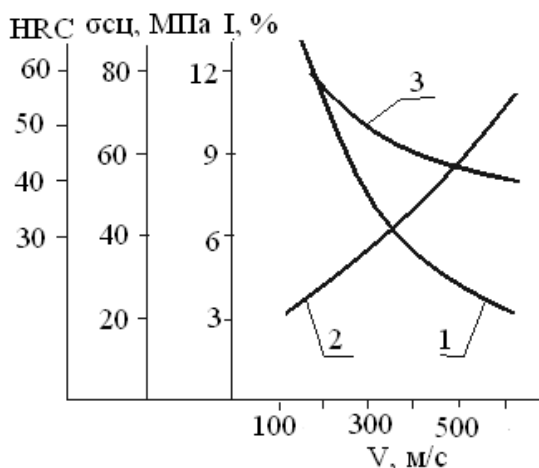


Рис. 3. Влияние скорости истечения струи продуктов сгорания пропано-воздушной смеси из сопла ( $V$ , м/с) на свойства восстановленных поверхностей при электродуговом напылении: 1 – пористость ( $\Pi$ , %); 2 – прочность сцепления ( $\sigma_{ср}$ , МПа); 3 – микротвердость ( $HRC_s$ )

Одними из важных технологических факторов при электродуговом напылении являются давление распыляющего газа и дистанции напыления. Большинство исследователей [5–7] сходятся во мнении, что повышение давления способствует увеличению адгезии покрытия с восстанавливаемой поверхностью. Повышение дистанции напыления с одной стороны способствует увеличению скорости частиц, а с другой – к повышенному окислению частицы и снижению ее температуры. Прочность сцепления электродуговых покрытий с восстанавливаемой поверхностью в зависимости от дистанции напыления представлена в табл. 2.

В результате проведенных исследований установлено, что оптимальный диапазон дистанции напыления находится в диапазоне 80–150 мм. Пори-

стость покрытий, материал которых распыляется продуктами сгорания пропано-воздушной смеси при минимальной скорости перемещения электродугового аппарата (при нанесении покрытия за один проход), при сокращении дистанции напыления до 100 мм снижается, а затем растет до величин, характерных для покрытий, материал которых распыляется сжатым воздухом (рис. 4).

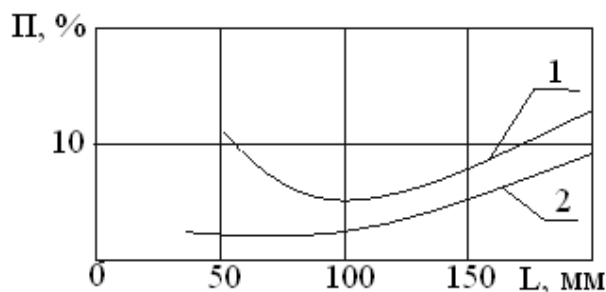


Рис. 4. Зависимость пористости восстановленных поверхностей от дистанции напыления при различных скоростях перемещения электродугового аппарата: 1 –  $P_g = 0,6$  МПа;  $V_{пм} = 0,2$  м/с; 2 –  $P_g = 0,6$  МПа;  $V_{пм} = 0,6$  м/с

Увеличение скорости перемещения электродугового аппарата на коротких дистанциях  $L_n \approx 80–100$  мм ведет к заметному снижению пористости восстановленных поверхностей как в случае распыления материала покрытия продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, так и в при распылении их воздухом.

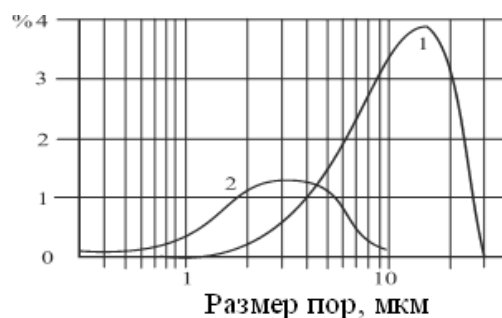


Рис. 5. Распределение пор по размерам при распылении материала покрытий: 1 – сжатым воздухом, 2 – продуктами сгорания пропано-воздушной смеси

Слабое влияние скорости перемещения электродугового аппарата на величину пористости на средних дистанциях напыления  $L_n \approx 100–150$  мм является следствием снижения охлаждения частиц с  $\alpha_q \leq 1$  мкм до температур, при которых не происходит их налипания на микровыступы восстанавливаемой поверхности, что в свою очередь объясняется ослаблением эффекта образования «наростов». Таким образом, высокая скорость перемещения электродугового аппарата относительно поверхности детали, позволяет получать покрытия с наилучшими физико-механическими свойствами.

Результаты исследования пористости поверхностей, восстановленных электродуговыми покрытиями, представлены в табл. 3.

Таблица 2

Прочность сцепления электродуговых покрытий с восстановленной поверхностью в зависимости от дистанции напыления

Свойства покрытия	Расстояние от сопла до детали, мм						
	30	50	75	100	120	200	300
Прочность сцепления, МПа	80	100	90	110	120	70	60
Содержание оксидов в покрытии, %	100	120	130	15	16	25	30

Таблица 3

Пористость поверхностей, восстановленных электродуговыми покрытиями

Пористость, % при нанесении покрытий		
Нанесение покрытий	Распылением холодным сжатым воздухом	распылением продуктами сгорания пропано-воздушной смеси ( $\alpha=1,0$ )
Минимальная	9,034	3,639
Максимальная	21,724	6,722
Средняя	15,379	5,181

Размер распыляемых частиц и пор уменьшаются в 2–3 раза при распылении проволок продуктами сгорания пропано-воздушной смеси (рис. 5). Это объясняется существенным снижением размеров сужений поровых каналов в напыленных покрытиях [8–10]. Исследование механических свойств электродуговых покрытий показало, что предел прочности при растяжении  $\sigma_b$  заметно выше при распылении материала покрытия продуктами сгорания пропано-воздушной смеси по сравнению с пределом прочности при растяжении  $\sigma_b$  при распылении материала покрытия сжатым воздухом. Особенно эта зависимость проявляется при напылении на коротких дистанциях 80–90 мм. Такое увеличение предела прочности при растяжении  $\sigma_b$  связано с снижением пористости покрытия и с увеличением когезии между частицами в слое покрытия. Более высокие механические свойства в совокупности со снижением остаточных напряжений в электродуговых покрытиях имеют место при формировании покрытий распылением продуктами сгорания пропано-воздушной смеси и значительно снижают возможность трещинообразования в покрытиях.

## 6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Установлено, что снижение остаточных напряжений в покрытии, полученном при распылении материала покрытия продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, в первую очередь связано с меньшим размером распыляемых частиц, которые деформируются при ударе о восстанавливаемую поверхность.

2. Вследствие особенностей процесса восстановления поверхностей электродуговыми покрытиями, полученными распылением проволочных сталей продуктами сгорания пропано-воздушной смеси, восстановленная поверхность детали с покрытием устойчивее против трещинообразования при увели-

ченной толщине  $\delta$  в сравнении с деталями с газоплазменными и плазменными покрытиями.

3. В плазменных покрытиях резко возрастает вероятность растрескивания при их толщине свыше 0.7 мм за счет дополнительного нагрева плазменной струей.

4. При распылении проволочных сталей продуктами сгорания пропано-воздушной смеси возможно нанесение на восстанавливаемую поверхность покрытия толщиной 0.5–7.0 мм. При этом уровень термических напряжений не приводит к образованию трещин.

## Литература

1. Шоршоров, М. Х. Состояние и перспективы нанесения покрытий распылением [Текст] / М. Х. Шоршоров, В. В. Кудинов, Ю. А. Харламов // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 5. – С. 13–24.
2. Витязь, П. А. Теория и практика газотермического напыления [Текст] / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, Е. Д. Манойло и др. – Минск: Наука и техника, 1993. – 295 с.
3. Шмелева, П. М. Контроль работ по металлопокрытиям [Текст] / П. М. Шмелева. – М.: Машиностроение, 1985. – 156 с.
4. Brusilo, Y. V. Investigation of properties of coatings deposited by different arc spraying methods [Text] / Y. V. Brusilo, A. E. Cherepko // Science-Based Technologies. – 2013. – Vol. 4, Issue 20. – P. 366–371.
5. Рыжов, Э. В. О прочности сцепления покрытия, наносимого напылением, со стальной основой [Текст] / Э. В. Рыжов, А. Ф. Чистопьян, В. С. Харламов // Вест. Машиностроения. – 1973. – № 12. – С. 32–35.
6. Ляшенко, Б. А. О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий [Текст] / Б. А. Ляшенко // Проблемы прочности. – 1980. – № 10. – С. 114.
7. Соколов, И. К. Влияние способа подготовки напыляемой поверхности на прочность сцепления газотермического покрытия [Текст] / И. К. Соколов, А. Н. Еремичев // Порошковая металлургия. – 1993. – № 2. – С. 26–30.
8. Харламов, Ю. А. Прогнозирование пористости порошковых покрытий [Текст] / Ю. А. Харламов // Порошковая металлургия. – 1990. – № 12. – С. 36–41.
9. Дехтярь, Л. И. Определение остаточных напряжений в покрытиях и биметаллах [Текст] / Л. И. Дехтярь. – Кишинева: Карта молдовеняске, 1968. – 175 с.
10. Харламов, Ю. Л. О роли скорости и температуры частиц при газотермическом напылении [Текст] / Ю. Л. Харламов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 3. – С. 69–73.

## References

1. Shorshorov, M. H., Kudinov, V. V., Harlamov, Ju. A. (1977). Sostojanie i perspektivy nanesenija pokrytij raspyleniem. Fizika i himija obrabotki materialov, 5, 13–24.
2. Vitjaz, P. A., Ivashko, V. S., Manojlo, E. D. et. al. (1993). Teorija i praktika gazotermicheskogo napylenija. Minsk: Nauka i tjehnika, 295.
3. Shmeleva, P. M. (1985). Kontrol' rabot po metallo-pokrytijam. Moscow: Mashinostroenie, 156.

4. Brusilo, Y. V., Cherepko, A. E. (2013). Investigation of properties of coatings deposited by different arc spraying methods. *Science-Based Technologies*, 4 (20), 366–371.

5. Ruzhov, E. V., Chystopian, A. F., Kharchenkov, V. S. (1973). O prochnosti stseplenyia pokrutyia, nanosymoho napulenyem, so stalnoi osnovoi. *Vest. Mashynostroeniia*, 12, 32–35.

6. Liashenko, B. A. (1980). O kryteryakh adheztonno-kohezyonnoi ravnoprochnosti y termostoikosty zashchytnukh pokrutyi. *Problemu prochnosti*, 10, 114.

7. Sokolov, Y. K., Eremychev, A. N. (1993). Vlyianye sposoba podgotovky napuliaemoi poverkhnosti na prochnost

stseplenyia hazotermicheskoho pokrutyia. *Poroshkovaja metallurgija*, 2, 26–30.

8. Harlamov, Ju. A. (1990). Prognozirovaniye poristosti poroshkovykh pokrytij. *Poroshkovaja metallurgija*, 12, 36–41.

9. Dehtjar, L. I. (1968). Opredeleniye ostatocnykh naprazhenij v pokrytijah i bimetallah. *Kishenev: Kartja moldovenjaske*, 175.

10. Harlamov, Ju. L. (1983). O roli skorosti i temperatury chastic pri gazotermicheskom napylenii. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 3, 69–73.

*Дата надходження рукопису 28.10.2016*

**Дмитриченко Николай Федорович**, доктор технических наук, профессор, ректор, Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, г. Киев, Украина, 01010

E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua

**Тамаргазин Александр Анатоліевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра технологий аэропортов, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

E-mail: avia-icao@mail.ru

**Пугачевская Евгения Петровна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологий аэропортов, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058

E-mail: janed2003@ukr.net

**Dmitrichenko Nikolay**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, National Transport University, Suvorova str, 1, Kyiv, Ukraine, 01010

E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua

**Tamargazin Alexander**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department major technologies airports, National Aviation University, Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, Ukraine, 03058

E-mail: avia-icao@mail.ru

**Pugachevskaya Evgenya**, PhD, associate professor, Department major technologies airports, National Aviation University, Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, Ukraine, 03058

E-mail: janed2003@ukr.net

УДК 637.04

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.86272

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІЛКА ТВАРИННОГО

© О. Б. Дроменко, М. О. Янчева

## RESEARCH OF THE COMPLEX OF FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ANIMAL PROTEIN

© O. Dromenko, M. Yancheva

*Представлено аналіз результатів аналітичних та практичних досліджень комплексу функціонально-технологічних властивостей білка тваринного марки Gelexcel A-95 як основи для створення функціональних комплексних добавок. Встановлено закономірності їх змін залежно від технологічних чинників, визначено раціональні параметри регідрації білка тваринного, умови гелеутворення, емульгування для подальшого застосування в технологічному процесі виробництва м'ясопродуктів*

**Ключові слова:** тваринний білок, регідрація, вологопоглинаюча здатність, гелі, суспензії, емульсії, температура, м'ясопродукти

*The analysis of the results of analytical and practical research of the complex of functional and technological properties of animal protein Gelexcel A-95 as the basis for creation of complex functional additives is shown. The regularities of their changes are determined depending on technological factors. Rational parameters of animal protein rehydration, gelation conditions, emulsification for further use in the process of production of meat products are identified*

**Keywords:** animal protein, rehydration, moisture-absorbing ability, gels, suspensions, emulsions, temperature, meat products