

## Влияние количественного содержания кремния на структуру припоя Cu55Ni6Mn4Zn и на структуру и свойства паяных соединений

**Пашков Игорь Николаевич**<sup>1,3</sup>, доктор технических наук, профессор кафедры 1101  
**Гаджиев Магомед Ражабович**\*<sup>1,4</sup>, аспирант

**Таволжанский Станислав Анатольевич**<sup>2,5</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов»

**Базлова Татьяна Алексеевна**<sup>2,6</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов»

**Баженов Вячеслав Евгеньевич**<sup>2,7</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов»

**Катанаева Диана Андреевна**<sup>2</sup>, магистрант

<sup>1</sup>Московский авиационный институт, Москва (Россия)

<sup>2</sup>Университет науки и технологий МИСИС, Москва (Россия)

\*E-mail: maga.2630@gmail.com

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2511-2845>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1922-6635>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6062-397X>

<sup>6</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9517-5871>

<sup>7</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

Поступила в редакцию 24.06.2024

Пересмотрена 12.12.2024

Принята к публикации 06.03.2025

**Аннотация:** Медно-цинковый сплав Cu55Ni6Mn4Zn (МНМц55-6-4) широко применяется для пайки твердосплавного инструмента и сталей. Однако наличие кремния в составе сплава (0,1–0,4 % мас.) может приводить к образованию хрупких силицидов железа, никеля и марганца, что негативно влияет на прочность паяных соединений. Цель исследования – определение влияния количественного содержания кремния в медно-цинковом припое, легированном совместно никелем и марганцем, на структуру заготовок припоя перед пайкой и структуру и свойства паяных соединений. В работе использовались методы микроструктурного анализа, включая электронную микроскопию и микрорентгеноспектральный анализ, для изучения распределения силицидов в слитках, лентах и паяных швах. Результаты показали, что при содержании кремния до 0,2 % мас. силициды образуют мелкодисперсные включения, равномерно распределенные в объеме шва. Однако при увеличении содержания кремния до 0,4 % мас. наблюдается формирование сплошных слоев силицидов железа вдоль границы «припой – сталь», что приводит к хрупкому разрушению соединений при механических нагрузках. Особенно критичным оказалось влияние малых зазоров при пайке, где образование крупных кристаллов силицидов железа значительно снижает прочность соединений. Научная новизна работы заключается в установлении оптимального содержания кремния в сплаве (не более 0,2 % мас.) для минимизации негативного влияния силицидов на свойства паяных соединений. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологических рекомендаций при производстве припоев и пайке сталей, что позволит повысить надежность и долговечность паяных соединений в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** пайка твердосплавного инструмента; Cu55Ni6Mn4Zn (МНМц55-6-4); влияние кремния на паяные соединения; силициды железа в паяных швах; микроструктура паяного шва; хрупкость паяных соединений; оптимизация состава припоя.

**Для цитирования:** Пашков И.Н., Гаджиев М.Р., Таволжанский С.А., Базлова Т.А., Баженов В.Е., Катанаева Д.А. Влияние количественного содержания кремния на структуру припоя Cu55Ni6Mn4Zn и на структуру и свойства паяных соединений // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 1. С. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-4.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных способов соединения твердых сплавов со сталью является пайка [1]. Сплав Cu55Ni6Mn4Zn (МНМц55-6-4) представляет собой нейзильбер с высоким содержанием марганца и успешно применяется в России и за рубежом для пайки твердосплавного инструмента [2; 3] наряду с припоем Cu49Ni9Zn (ЛНМц49-9-0,2) [4; 5]. Состав и температура плавления этих сплавов представлены в таблице 1. Высокая температура плавления и пайки позволяет после за-

твердевания припоя осуществлять термообработку стальных корпусов инструмента в виде закалки с 860–900 °С в масло или эмульсию с последующим отпуском [6].

Влияние легирующих элементов на свойства медно-цинковых сплавов изучено достаточно глубоко. Добавки алюминия, марганца, железа, никеля улучшают механические свойства латуней и их теплостойкость [7; 8]. Легирование марганцем способствует улучшению смачивания стали и твердого сплава расплавом припоя [9]. Легирование никелем значительно повышает механические

**Таблица 1.** Состав сплавов Cu55Ni6Mn4Zn35 и Cu49Ni9Zn42, а также их температуры плавления и пайки  
**Table 1.** Compositions of Cu55Ni6Mn4Zn35 and Cu49Ni9Zn42 alloys and their melting and brazing temperatures

Сплав	Химический состав, % мас.					T <sub>solidus</sub> , °C	T <sub>liquidus</sub> , °C	T <sub>пайки</sub> , °C
	Cu	Zn	Ni	Mn	Si			
Cu55Ni6Mn4Zn35	54–56	ост.	5,5–6,5	3,5–4,5	0,1–0,4	890	920	920–1040
Cu49Ni9Zn42	48–50	ост.	9–11	0,1–0,2	0,1–0,25	915	930	930–980

свойства латуней [10]. Легирование оловом может незначительно повысить прочность соединений стали с твердым сплавом на сдвиг [11]. Сплав Cu49Ni9Zn42 за счет легирования никелем позволяет получить значительно более прочные соединения, чем паяные двухкомпонентной латунию [12–14]. Сравнительные исследования соединений, выполненных с помощью латунного припоя и нейзильбера Cu49Ni9Zn42, подтверждают тезис о том, что добавка никеля значительно увеличивает прочность соединений [15; 16]. Припой на основе медно-цинковых сплавов для пайки твердого сплава обычно легированы совместно никелем и марганцем. В справочной литературе и стандартах на припой также указывается на наличие кремния в количестве 0,1–0,4 % мас. Однако практически нигде не упоминается о влиянии количественного содержания кремния на формирование паяного шва и свойства паяных соединений, выполненных с помощью припоев, совместно легированных никелем и марганцем.

Считается, что кремний нейтрализует негативное влияние примеси железа на коррозионную стойкость латуни за счет образования силицидов железа [17]. Он повышает технологичность процессов пайки и сварки за счет того, что оксидная пленка кремния уменьшает окисление цинка при высоких температурах. Латуни, содержащие добавки кремния, имеют лучшие технологические свойства и обеспечивают более высокую плотность и герметичность шва.

Добавка кремния в латунных припоях может снижать пластичность и прочность паяного соединения из стали за счет образования хрупкой прослойки интерметаллида Fe–Si на границе «припой – сталь». Поэтому при пайке сталей латунию легирование последней кремнием рекомендуется ограничить – не более 0,3 % мас. Никель обладает большим химическим сродством с кремнием, чем с железом. При введении Cu–Zn в припой, содержащий 0,5 % Si и 2 % Ni, кремний связывается с никелем в химическое соединение и не образует интерметаллида с железом по границе шва<sup>1</sup>. Этот же эффект наблюдается при лазерной пайке сталей с помощью припоя на основе меди с 3 % мас. кремния [18]. Несмотря на малое время нагрева до высоких температур, на границе припоя со сталью формируется прослойка силицидов железа [19], которые также присутствуют в виде мелких включений в объеме шва. Механические испытан

ия таких соединений показывают, что в основном разрушение происходит именно по границе «припой – сталь» из-за наличия таких соединений [20].

Силициды железа, никеля и марганца имеют высокую температуру плавления: NiSi – 992 °C, FeSi – 1410 °C и MnSi – 1280 °C<sup>2,3</sup>. Энтальпии образования различных силицидов имеют близкие значения, так что возможно и комплексное образование силицидов марганца и никеля, а при наличии железа в припое – силицидов железа. Известно, что некоторые силициды железа имеют более низкую стандартную энтальпию образования, чем силициды никеля. Это может приводить к тому, что даже в паяных швах, полученных с использованием припоев, легированных никелем, могут образовываться силициды железа [21].

Таким образом, влияние количественного содержания кремния в медно-цинковых припоях при совместном легировании никелем и марганцем на структуру и свойства паяных соединений изучено недостаточно.

Цель исследования – определение влияния количественного содержания кремния в медно-цинковом припое, легированном совместно никелем и марганцем, на структуру заготовок припоя перед пайкой и структуру и свойства паяных соединений.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения структуры слитков и прессованных лент из сплава Cu55Ni6Mn4Zn35 (МНМц55-6-4) отбирались промышленные образцы производства АО «АЛАРМ» (Россия), отлитые в металлический кокиль. Плавка образцов проводилась в индукционной печи в шамотно-графитовом тигле марки АХ 200, где 200 – вместимость тигля (по меди) 200 кг. После расплавления меди и никеля осуществлялось раскисление меди фосфором и введением кускового кремния. Кремний вводился из расчета 0,35 % мас. Марганец использовался электролитический Mn985. При плавке использовались отходы собственного производства в количестве 30–40 %. Полученные слитки диаметром 50 мм подвергались горячему прессованию на гидравлическом прессе с усилием 300 т через матрицу размером 10×1 мм. Температура слитка при прессовании составляла 700 °C. Прессованная лента имела размеры 10×1 мм.

<sup>2</sup> Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 3. Кн. 1 / под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001. 972 с.

<sup>3</sup> Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2. М.: Металлургия, 1997. 1024 с.

<sup>1</sup> Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

Для изучения влияния содержания кремния в паяных швах отдельно были выплавлены образцы сплавов малого объема с различным содержанием кремния. Плавка отличалась тем, что, в отличие от промышленной плавки, расплав меди не раскисляли фосфором и кремний вводили в виде лигатуры  $\text{Cu} - 10\% \text{ мас. Si}$ . Образцы выплавляли в индукционной печи в шамотно-графитном тигле марки АХ 5 ОАО «Лужский абразивный завод» (Россия). Шихтовка проводилась из расчета получения 2,5 кг сплава из чистых компонентов, бескислородной меди М0, никеля НП-1, марганца Мн985, цинка Ц0. В расплавленной меди под слоем пробат-флюса растворяли никель, затем марганец, после вводили лигатуру  $\text{Cu-Si}$  и цинк. Расчетное содержание кремния в сплаве составляло 0,1; 0,2; 0,4 % мас. Полученный расплав разливали в водоохлаждаемую изложницу диаметром 50 мм. Полученные слитки прессовали на гидравлическом прессе при температуре 700 °С для формирования ленты припоя размером 10×1 мм.

Из полученных образцов слитков и лент изготавливались шлифы для исследований на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA SBH 3 (Чехия) с приставкой Oxford Instruments (Великобритания) для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Диаметр зонда составлял 1 мкм.

Для изучения влияния кремния на структуру паяных швов были изготовлены макеты соединений, по размеру и форме приближающиеся к паяным горным резцам, только вместо твердого сплава была использована вставка из стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) диаметром 18 мм, а внешний корпус был изготовлен из низкоуглеродистой стали 10 (рис. 1). Нагрев макетов под пайку осуществляли на индукционной установке СЭЛТ-001-15/66-Т (Россия) с частотой 40–70 кГц в цилиндрическом индукторе. Температура пайки составляла 940–950 °С. Время пайки составляло 90 с. Макет вставки из стали 30ХГСА окунался в пасту флюса на основе калиевой буры, боратов и фторидов щелочных металлов ФП2 (ТУ 48-17228138/ОПП-004-2001) и помещался в отверстие корпуса, на дно которого укладывались пластинки припоя общей массой 3,6 г для обеспечения заполнения всего зазора. В процессе нагрева происходило расплавление припоя, и вставка опускалась на дно корпуса. Время и мощность на установке пайки выбирались та-

ким образом, чтобы в конце процесса была сформирована сплошная галтель. Таким образом обеспечивалась одинаковая выдержка всех образцов при пайке.

После пайки образцы разрезали вдоль оси и готовили металлографические шлифы для исследования на электронном микроскопе TESCAN VEGA SBH 3 (Чехия). Элементный состав определяли с помощью энергодисперсионного микроанализатора Oxford Instruments (Великобритания).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Структура слитков и лент припоя $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{6}\text{Mn}_{4}\text{Zn}_{35}$ (МНМц55-6-4) в зависимости от содержания кремния

На рис. 2 представлены снимки микроструктуры литых образцов, полученных в ходе промышленной плавки с использованием раскисления фосфором и введения кускового кремния 0,35 % мас. в сравнении с образцом, изготовленным без раскисления меди фосфором и с введением кремния 0,2 % мас. в виде лигатуры  $\text{Cu}_{10}\text{Si}$ . В структуре наблюдаются темные участки, расположенные по границам дендритных ячеек, результаты их МРСА представлены в таблице 2.

Структура промышленных лент припоя после горячего прессования представлена на рис. 3. Заметно, что темные участки имеют вид дисперсных включений размером 2–10 мкм и равномерно распределены по площади шлифа. Во всех образцах присутствует железо в количестве 0,2 % мас. При этом следует отметить, что с уменьшением содержания кремния темная фаза становится более дисперсной. Состав темных участков аналогичен фазам в литой структуре и содержит кремний в количестве около 10 % мас. и фосфор в количестве 1,7–3 % мас.

### Структура паяных швов, выполненных припоем с различным содержанием кремния

При пайке стальных макетов горных резцов были получены неодинаковые структуры в донной и боковой частях соединения. В структуре паяных швов наблюдаются мелкодисперсные включения преимущественно железа, а также никеля и марганца в центральной части шва и вдоль границы раздела «припой – основной материал», что подтверждается результатами МРСА (рис. 4).

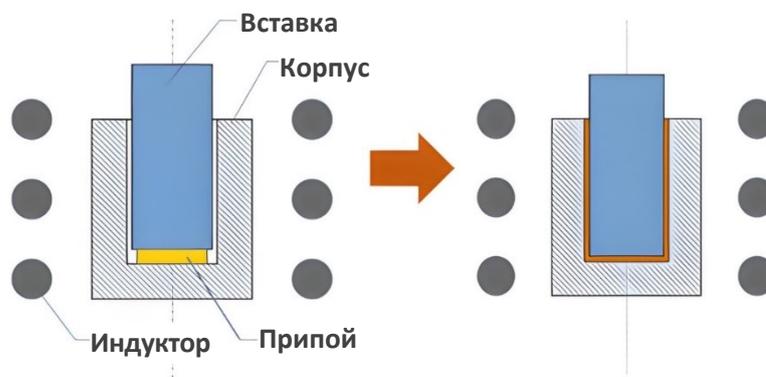
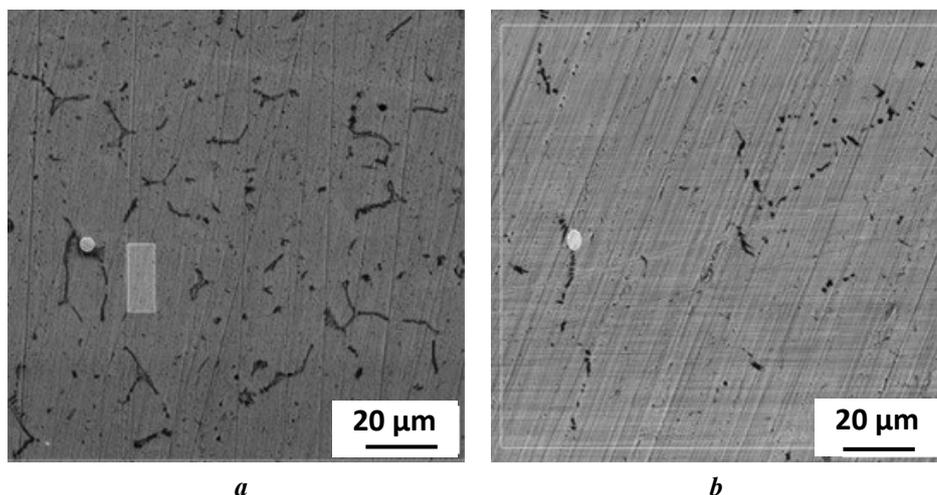


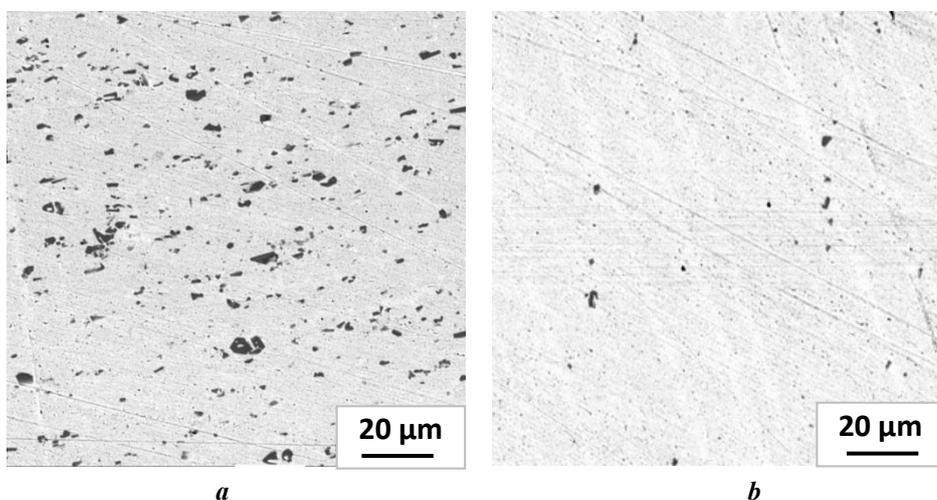
Рис. 1. Схема индукционной пайки макета горного резца припоем  $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{6}\text{Mn}_{4}\text{Zn}_{35}$   
Fig. 1. Scheme of induction brazing of a mining cutter model with the  $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{6}\text{Mn}_{4}\text{Zn}_{35}$  brazing alloy



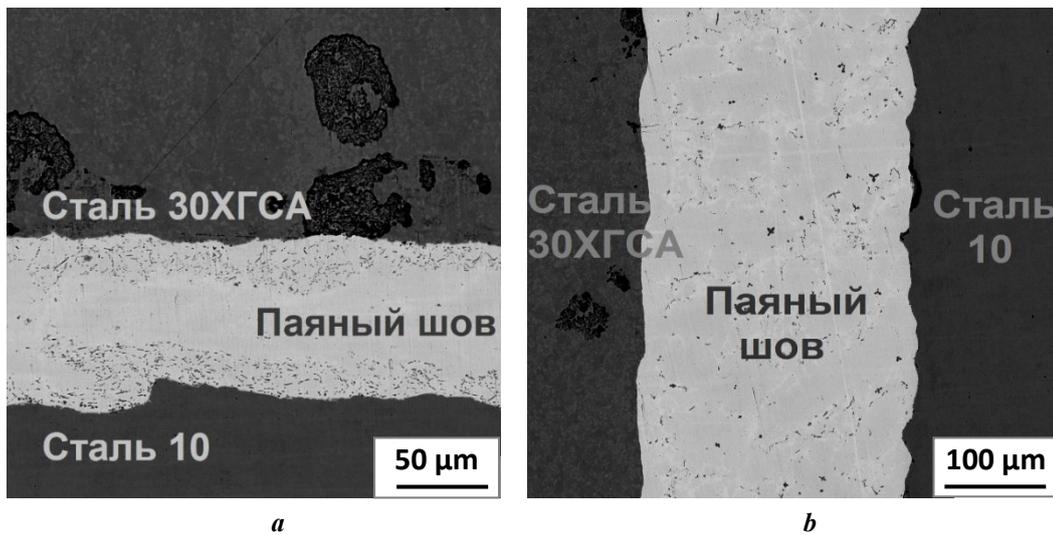
**Рис. 2.** Микроструктура слитков припоя Cu55Ni6Mn4Zn35 (МНМц55-6-4): **a** – промышленная плавка; **b** – экспериментальная плавка без раскисления фосфором и с введением кремния лигатурой  
**Fig. 2.** Microstructure of Cu55Ni6Mn4Zn35 (MNMts55-6-4) brazing alloy ingots: **a** – industrial melting; **b** – experimental melting without deoxidation with phosphorous and with the introduction of silicon by doping material

**Таблица 2.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа слитков в литом состоянии, % мас.  
**Table 2.** Results of X-ray spectral microanalysis of ingots in as-cast condition, % wt.

Область анализа	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
<b>Промышленный образец</b>								
Светлый участок	0,01	–	0,87	3,37	–	5,75	54,2	33,42
Темный участок	9,1	2,43	–	16,96	1,12	44,13	17,0	9,26
Анализ сплава	0,4	–	–	3,92	0,18	5,6	52,01	37,89
<b>Экспериментальный образец</b>								
Темный участок	10,56	–	–	18,23	0,05	52,35	13,48	5,33
Анализ сплава	0,26	–	–	4,26	0,02	5,98	54,78	34,7



**Рис. 3.** Микроструктура лент припоя при различном содержании кремния (не травлено): **a** – 0,57 % Si; **b** – 0,31 % Si  
**Fig. 3.** Microstructure of brazing alloy bands with different silicon content (not etched): **a** – 0.57 % of Si; **b** – 0.31 % of Si

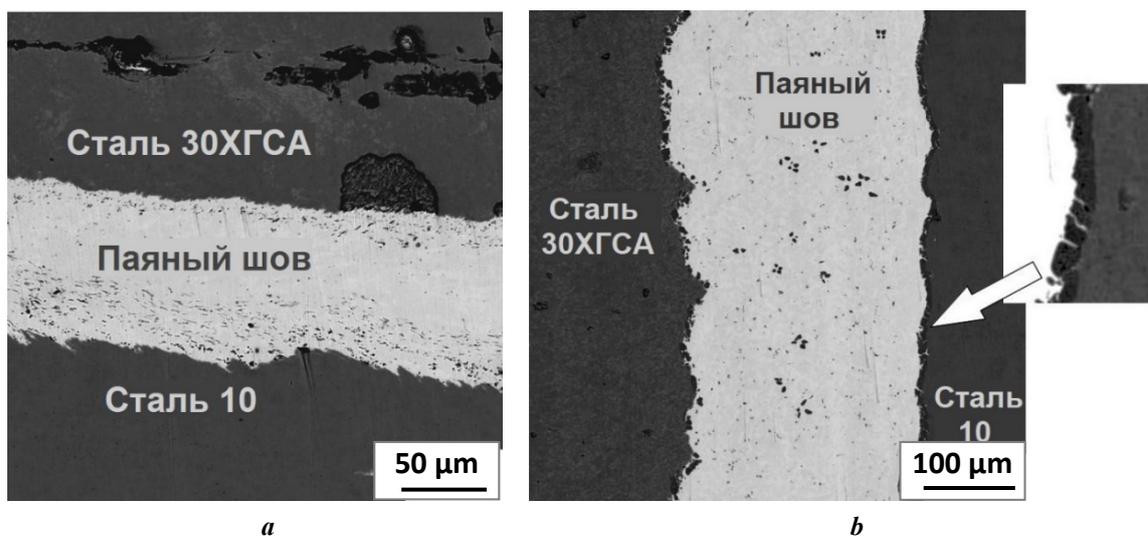


**Рис. 4.** Микроструктура макета соединений горных резцов, выполненных припоем  $Cu55Ni6Mn4Zn35$  (МНМц55-6-4) с содержанием кремния 0,2 % мас.: **a** – донная часть; **b** – боковая часть

**Fig. 4.** Microstructure of the model of the joints of mining cutters made with  $Cu55Ni6Mn4Zn35$  (MNMTs55-6-4) brazing alloy with a silicon content of 0.2 wt. %: **a** – bottom part; **b** – side part

Из-за малых размеров фазы не удалось установить ее точный состав, предположительно это силициды железа. При малых содержаниях кремния 0,1 и 0,2 % мас. дисперсные включения расположены в объеме шва и не формируют крупных образований, которые могли бы стать концентраторами напряжений для образования трещин при нагружении соединений. Структура швов при содержании кремния 0,1 и 0,2 % мас. идентична, поэтому на рис. 4 приведена структура соединения с 0,2 % мас. кремния. Структура швов при содержании кремния 0,4 % мас. приведена на рис. 5.

При содержании кремния 0,4 % мас. картина коренным образом меняется. На границе стали с припоем, особенно со стороны стали 30ХГСА, в составе которой имеется кремний (0,8 % мас. согласно МРСА), наблюдается формирование крупных кристаллов правильной формы, образующих сплошной слой на границе «сталь – припой». Такая картина наблюдается при нормальной величине паяльного зазора (50–100 мкм). Совершенно иначе формируется структура в малых зазорах (менее 50 мкм). В процессе пайки происходит формирование извилистой границы шва (рис. 6). На границе «припой –



**Рис. 5.** Микроструктура макета соединений горных резцов, выполненных припоем  $Cu55Ni6Mn4Zn35$  (МНМц55-6-4) с содержанием кремния 0,4 % мас.: **a** – донная часть; **b** – боковая часть

**Fig. 5.** Microstructure of the model of the joints of mining cutters made with  $Cu55Ni6Mn4Zn35$  (MNMTs55-6-4) brazing alloy with a silicon content of 0.4 wt. %: **a** – bottom part; **b** – side part

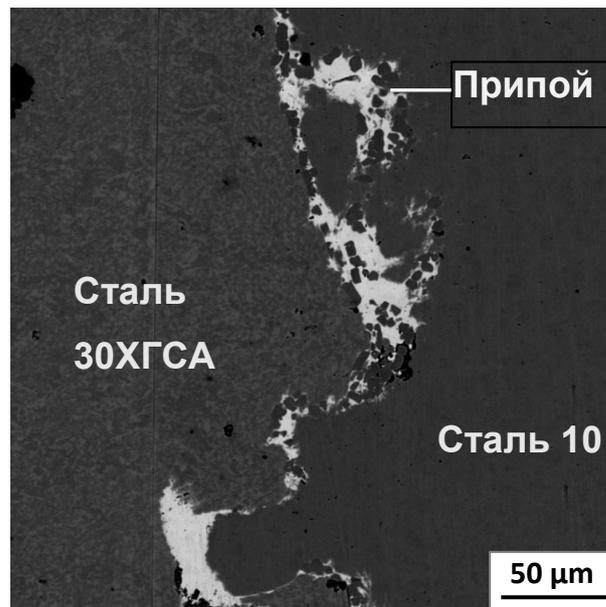


Рис. 6. Структура паяного шва при его толщине менее 50 мкм  
 Fig. 6. The structure of the brazed seam at its thickness less than 50  $\mu\text{m}$

сталь» формируются крупные кристаллы на основе соединений железа и никеля с кремнием, которые в некоторых местах практически перекрывают весь шов. Анализ профилей распределения элементов свидетельствует о том, что это силициды железа и никеля (рис. 7). Размер включений достигает 10 мкм.

Формирование сплошного слоя силицидов железа и никеля привело к снижению прочности на срез в 4 раза по сравнению с образцом, где содержание кремния составляло 0,2 % мас. Поверхность разрушения проходит по границе «припой – сталь» вдоль этого слоя (рис. 8).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Влияние кремния на структуру слитков и прессованных лент

Литая структура сплава  $\text{Cu55Ni6Mn4Zn35}$  (МНМц55-6-4) промышленного производства характеризуется наличием включений по границам зерен. Данные включения содержат не только кремний, но и фосфор. Очевидно, что раскисление сплава фосфором избыточно, и даже малое его содержание провоцирует образование фаз по границам зерен. Литая структура экспериментального сплава, не содержащего фосфор, отличается от структуры промышленного образца. Наблюдается наличие темных участков, богатых кремнием, марганцем и никелем, однако они имеют менее протяженную форму и более дисперсные, что в целом соответствует литературным данным [21].

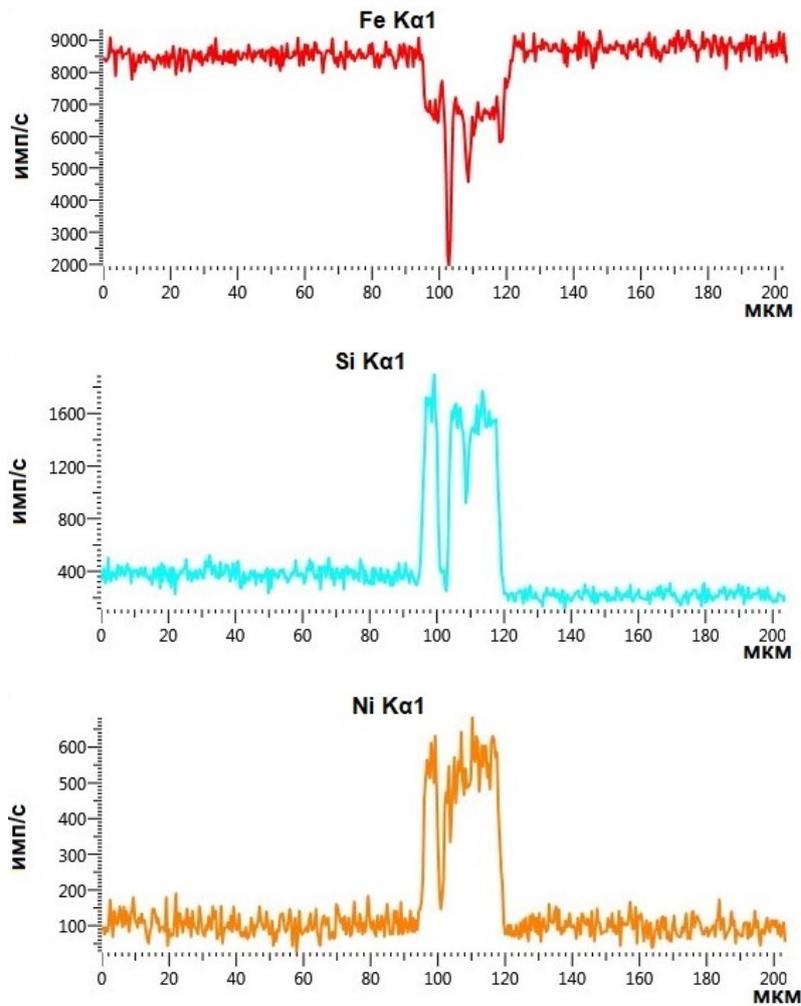
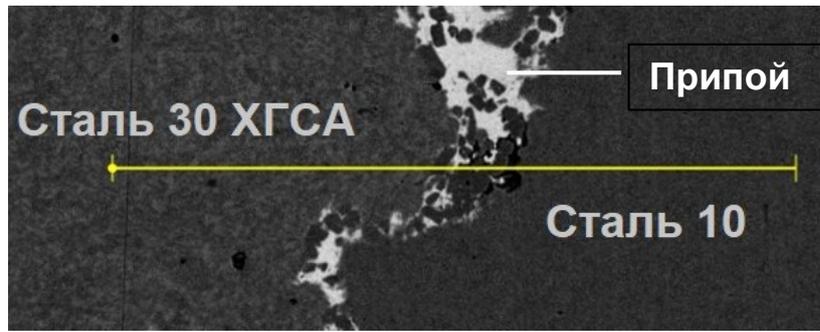
Использование горячего прессования слитков для получения лент приводит к заметному измельчению включений. Измельчение включений происходит при прессовании ленты размером  $10 \times 1$  мм из слитка диаметром 50 мм. Результатом прессования сплава в такую форму является высокая степень обжата (около 200). При содержании кремния свыше 0,3 % мас. включения

становятся более крупными – до 10 мкм и более в сравнении с 2–4 мкм при малом содержании кремния. Количество кремнийсодержащей фазы увеличивается с ростом содержания кремния в сплаве. Влияние содержания железа в количестве примерно 0,2 % мас. на структуру сплава не выявлено.

### Влияние кремния на структуру паяных швов

В паяных швах кроме кремния, содержащегося в припое, в диффузионных процессах может принимать участие кремний из стали 30ХГСА. В структуре швов наблюдается образование мелких включений соединений железа и никеля с кремнием, которые в основном расположены вдоль границы «припой – основной металл», что соответствует данным при лазерной пайке сталей припоем  $\text{Cu-Si}$  [18]. Концентрация их растет в областях малых зазоров, однако сплошных слоев, способных сыграть роль концентраторов напряжений при содержании кремния 0,1–0,2 % мас., не обнаружено, в отличие от 0,4 % мас. кремния при капиллярной пайке и 3 % мас. кремния при лазерной пайке. Очевидно, что данные включения формируются за счет растворения железа в припое и его взаимодействия с кремнием, что приводит к образованию в объеме расплава силицидов, располагающихся вдоль границ стали. Таким образом, кремний в припое связывается с железом в устойчивые соединения, которые могут располагаться как в объеме медно-цинкового сплава [17], так и вдоль границы раздела «припой – сталь» без образования сплошного слоя [19].

При увеличении содержания кремния в припое до 0,4 % мас. наблюдается образование крупных четко ограненных кристаллов в виде сплошного слоя вдоль границы «сталь – припой», причем их размеры и концентрация выше со стороны стали, легированной кремнием (30ХГСА), что больше соответствует паяным швам с припоем  $\text{Cu-3 \% Si}$  [20]. Таким образом, подтверждаются утверждения об опасности превышения



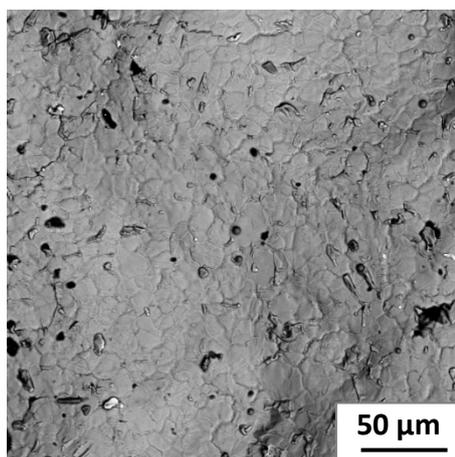
**Рис. 7.** Изменение содержания железа, кремния и никеля поперек паяного шва при содержании кремния в припое 0,4 % мас.  
**Fig. 7.** Change in the content of iron, silicon and nickel across the brazed seam at a silicon content in the brazing alloy of 0.4 wt. %

содержания кремния в медно-цинковых припоях свыше 0,3 % мас. Однако для медно-цинковых припоев, совместно легированных никелем и марганцем, нами не обнаружено заметного влияния никеля на снижение формирования силицидов железа, хотя ранее считалось, что никель блокирует образование силицидов на границе «основной металл – припой»<sup>4</sup>. Возможно, это связано с тем, что припой Cu55Ni6Mn4Zn35 (МНМц55-6-4)

представляет собой не латунь, а сплав нейзильбер. Из-за высокого содержания никеля и марганца изменяется и растворимость железа в сплаве. Возможно, в данных условиях образуются силициды железа, имеющие меньшую стандартную энтальпию образования, чем силициды никеля [21].

Обнаружено критическое влияние зазора при пайке припоем с высоким содержанием кремния (0,4 % мас.). С одной стороны, при малой прослойке расплава припоя наблюдается изменение кривизны границы раздела «припой – сталь», с другой – кристаллы соединений

<sup>4</sup> Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.



**Рис. 8.** Разрушение паяного соединения вдоль границы «припой – сталь» при содержании кремния в припое 0,4 % мас.  
**Fig. 8.** Brazed joint destruction along the brazing alloy – steel interface at a silicon content in the brazing alloy of 0.4 wt. %

кремния, железа и никеля становятся крупнее и могут занимать существенный объем шва. Эти кристаллы могут являться концентраторами напряжений при нагружении соединений и приводить к хрупкому разрушению швов аналогично разрушению швов по границе «сталь – припой» в [20]. Ранее данное явление усиленного массопереноса при малых зазорах описано не было.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Содержание кремния в сплаве припоя Cu55Ni6Mn4Zn35 (МНМц55-6-4) играет заметную роль в формировании структуры паяных швов за счет образования дисперсных включений силицидов сложного состава. Наличие остаточного фосфора в сплаве приводит к образованию включений по границам зерен, которые могут негативно повлиять на прочностные свойства припоя. Раскисление фосфором указанного сплава избыточно и оказывает негативное влияние на литую структуру.

2. Применение горячего прессования слитков при производстве ленты припоя приводит к измельчению включений, однако их размер и количество четко коррелируют с содержанием кремния в сплаве. С ростом содержания кремния до 0,4 % мас. размеры включений и их доля в структуре паяных швов растут.

3. Обнаружено, что содержание кремния в припое до 0,2 % мас. приводит к образованию мелкодисперсных соединений железа и никеля с кремнием за счет растворения железа в расплаве припоя и образования сложных силицидов в объеме шва и вдоль границы «припой – основной материал». Эти включения распределены в шве неравномерно.

4. При достижении содержания кремния 0,4 % мас. силициды образуют сплошной слой вдоль границы «сталь – припой» в виде более крупных кристаллов правильной формы, высокое содержание никеля не препятствует этому образованию.

5. Критичным фактором, способным оказать влияние на свойства паяного соединения, является величина

зазора под пайку. При высоком содержании кремния наблюдается изменение кривизны границ и наличие в швах кристаллов на основе силицидов железа и никеля. В этом случае наблюдается снижение прочности соединений и разрушение соединений вдоль этих образований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Dissimilar joining of WC-Co to steel by low-temperature brazing // *Materials Science and Engineering: B*. 2020. Vol. 259. Article number 114597. DOI: [10.1016/j.mseb.2020.114597](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114597).
2. Коломейченко А.В., Соловьев Р.Р., Соловьев Р.Ю., Максимов Е.А., Карякин С.Б. Импортзамещение рабочих органов для мульчеров // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 18. № 2. С. 86–93. DOI: [10.12737/2073-0462-2023-86-93](https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-86-93).
3. Пашков И.Н., Мисников В.Е., Морозов В.А., Таволжанский С.А. Индукционная пайка твердосплавных резцов горного инструмента. Выбор состава и формы припоя // *Сварочное производство*. 2020. № 8. С. 20–27. EDN: [NXKPBY](https://www.edn.ru/NXKPBY).
4. Haghshenas M.S., Parvin N., Amirnasiri A. Effect of bonding temperature on microstructure and mechanical properties of WC-Co/steel diffusion brazed joint // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018. Vol. 71. P. 649–658. DOI: [10.1007/s12666-017-1197-4](https://doi.org/10.1007/s12666-017-1197-4).
5. Amirnasiri A., Parvin N. Dissimilar diffusion brazing of WC-Co to AISI 4145 steel using RBCuZn-D interlayer // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 28. Part 1. P. 82–93. DOI: [10.1016/j.jmapro.2017.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.06.001).
6. Пашков И.Н., Мисников В.Е., Морозов В.А., Гаджиев М., Базлова Т.А. Влияние состава припоя и флюса на термическую стабильность паяных PDC резцов // *Сварочное производство*. 2021. № 1. С. 44–50. EDN: [XTZQZM](https://www.edn.ru/XTZQZM).
7. Яковцева О.А., Михайловская А.В., Иржак А.В., Котов А.Д., Медведева С.В. Сравнение вкладов действующих механизмов сверхпластической деформации двойной и многокомпонентных латуней //

- Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 6. С. 643–650. DOI: [10.31857/S0015323020060182](https://doi.org/10.31857/S0015323020060182).
8. Yakovtseva O.A., Mikhaylovskaya A.V., Pozdniakov A.V., Kotov A.D., Portnoy V.K. Superplastic deformation behaviour of aluminium containing brasses // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 674. P. 135–143. DOI: [10.1016/j.msea.2016.07.053](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.053).
  9. Sui Yanwei, Luo Haibo, Lv Yang, Wei Fuxiang, Qi Jiqu, He Yezeng, Meng Qingkun, Sun Zhi. Influence of brazing technology on the microstructure and properties of YG20C cemented carbide and 16Mn steel joints // *Welding in the World*. 2016. Vol. 60. P. 1269–1275. DOI: [10.1007/s40194-016-0374-0](https://doi.org/10.1007/s40194-016-0374-0).
  10. Habibi F., Mostafapour A., Heydarpour K. Microstructural evaluation and mechanical properties of WC-6%Co/AISI 1045 steel joints brazed by copper, brass, and Ag-based filler metals: Selection of the filler material // *Journal of Advanced Joining Processes*. 2024. Vol. 9. Article number 100212. DOI: [10.1016/j.jajp.2024.100212](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100212).
  11. Chiu Liu Ho, Wang Hsin Fu, Huang Chia Pao, Hsu Ching Tsung, Chen Tsung Chi. Effect of brazing temperature on the microstructure and property of vacuum brazed WC-Co and carbon steel joint // *Advanced materials research*. 2008. Vol. 47-50. P. 682–685. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.682](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.682).
  12. Li Yuanxing, Zhu Zongtao, He Yongpan, Chen Hui, Jiang Chao, Han Dengquan, Li Junfu. WC particulate reinforced joint by ultrasonic-associated brazing of WC-Co/35CrMo // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 238. P. 15–21. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2016.06.037](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.037).
  13. Geng Haibin, Li Jinglong, Xiong Jiangtao, Shao Changbin, Zhang Fusheng. Interface Evolution of YG11C/42CrMo Joint Brazed with BCu64MnNi Filler Metal // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 56. P. 473–480. DOI: [10.1007/s11106-017-9918-0](https://doi.org/10.1007/s11106-017-9918-0).
  14. Yin Xiaohui, Ma Qunshuang, Cui Bing, Zhang Lei, Xue Xingyan, Zhong Sujuan, Xu Dong. Current review on the research status of cemented carbide brazing: filler materials and mechanical properties // *Metals and Materials International*. 2021. Vol. 27. P. 571–583. DOI: [10.1007/s12540-020-00608-w](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00608-w).
  15. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Influence of braze type on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/steel dissimilar joints // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 36. P. 450–458. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.015).
  16. Jiang Chao, Chen Hui, Zhao Xu, Qui Sifu, Han Dengquan, Gou Guoqing. Microstructure and mechanical properties of brazing bonded WC-15Co/35CrMo joint using AgNi/CuZn/AgNi composite interlayers // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 70. P. 1–8. DOI: [10.1016/j.jrmhm.2017.08.021](https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2017.08.021).
  17. Левин Д.О., Сулицин А.В., Усов Д.А., Шевченко К.А., Стругов С.С., Брусницын С.В. Влияние железа и кремния на коррозионную стойкость латуни // *Литейное производство*. 2023. № 12. С. 22–27. EDN: [YTNIUR](https://www.edn.ru/ytniur/).
  18. Cheng Zhi, Huang Jihua, Ye Zheng, Yang Jian, Chen Shuhai. Butt brazing of titanium alloys/stainless steel plates by MIG-TIG double-sided arc welding process with copper filler metal // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. № 1. P. 1566–1570. DOI: [10.1016/j.jmrt.2018.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.009).
  19. Koltsov A., Bailly N., Cretteur L. Wetting and laser brazing of Zn-coated steel products by Cu–Si filler metal // *Journal of materials science*. 2010. Vol. 45. № 8. P. 2118–2125. DOI: [10.1007/s10853-009-3949-y](https://doi.org/10.1007/s10853-009-3949-y).
  20. Suga T., Murai Ya., Kobashi T., Ueno K., Shindo M., Kanno K., Nakata K. Laser brazing of dissimilar joint of austenitic stainless steel and pure copper // *Welding International*. 2016. Vol. 30. № 3. P. 166–174. DOI: [10.1080/09507116.2014.921090](https://doi.org/10.1080/09507116.2014.921090).
  21. Рябухин А.Г., Груба О.Н. Энтальпия образования силицидов 3D-элементов периодической системы Д.И. Менделеева // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2007. № 3. С. 74–82. EDN: [KYSTJEJ](https://www.edn.ru/kystej/).

## REFERENCES

1. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Dissimilar joining of WC-Co to steel by low-temperature brazing. *Materials Science and Engineering: B*, 2020, vol. 259, article number 114597. DOI: [10.1016/j.mseb.2020.114597](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114597).
2. Kolomeychenko A.V., Solovev R.R., Solovev R.Yu., Maksimov E.A., Karyakin S.B. Import substitution of working units for mulchers. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 86–93. DOI: [10.12737/2073-0462-2023-86-93](https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-86-93).
3. Pashkov I.N., Misnikov V.E., Morozov V.A., Tavolzanskiy S.A. Induction brazing of carbide cutters for a mining tool. The choice of composition and solder form. *Welding international*, 2019, vol. 33, no. 10-12, pp. 411–417. DOI: [10.1080/09507116.2021.1894032](https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1894032).
4. Haghshenas M.S., Parvin N., Amirnasiri A. Effect of bonding temperature on microstructure and mechanical properties of WC-Co/steel diffusion brazed joint. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, vol. 71, pp. 649–658. DOI: [10.1007/s12666-017-1197-4](https://doi.org/10.1007/s12666-017-1197-4).
5. Amirnasiri A., Parvin N. Dissimilar diffusion brazing of WC-Co to AISI 4145 steel using RBCuZn-D interlayer. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 28, part 1, pp. 82–93. DOI: [10.1016/j.jmapro.2017.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.06.001).
6. Pashkov I.N., Misnikov V.E., Morozov V.A., Gadzhiev M., Bazlova T.A. Influence of solder and flux composition on thermal stability of brazed PDC cutters. *Welding International*, 2021, vol. 35, no. 1-3, pp. 121–126. DOI: [10.1080/09507116.2021.1963535](https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1963535).
7. Yakovtseva O.A., Mikhaylovskaya A.V., Kotov A.D., Medvedeva S.V., Irzhak A.V. Comparison of contributions of the mechanisms of the superplastic deformation of binary and multicomponent brasses. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, no. 6, pp. 582–589. DOI: [10.1134/S0031918X20060186](https://doi.org/10.1134/S0031918X20060186).
8. Yakovtseva O.A., Mikhaylovskaya A.V., Pozdniakov A.V., Kotov A.D., Portnoy V.K. Superplastic deformation behaviour of aluminium containing brasses. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 674, pp. 135–143. DOI: [10.1016/j.msea.2016.07.053](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.053).
9. Sui Yanwei, Luo Haibo, Lv Yang, Wei Fuxiang, Qi Jiqu, He Yezeng, Meng Qingkun, Sun Zhi. Influence of brazing technology on the microstructure and properties of YG20C cemented carbide and 16Mn steel

- joints. *Welding in the World*, 2016, vol. 60, pp. 1269–1275. DOI: [10.1007/s40194-016-0374-0](https://doi.org/10.1007/s40194-016-0374-0).
10. Habibi F., Mostafapour A., Heydarpour K. Microstructural evaluation and mechanical properties of WC-6%Co/AISI 1045 steel joints brazed by copper, brass, and Ag-based filler metals: Selection of the filler material. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2024, vol. 9, article number 100212. DOI: [10.1016/j.jajp.2024.100212](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100212).
  11. Chiu Liu Ho, Wang Hsin Fu, Huang Chia Pao, Hsu Ching Tsung, Chen Tsung Chi. Effect of brazing temperature on the microstructure and property of vacuum brazed WC-Co and carbon steel joint. *Advanced materials research*, 2008, vol. 47-50, pp. 682–685. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.682](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.682).
  12. Li Yuanxing, Zhu Zongtao, He Yongpan, Chen Hui, Jiang Chao, Han Dengquan, Li Junfu. WC particulate reinforced joint by ultrasonic-associated brazing of WC-Co/35CrMo. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 238, pp. 15–21. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2016.06.037](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.037).
  13. Geng Haibin, Li Jinglong, Xiong Jiangtao, Shao Changbin, Zhang Fusheng. Interface Evolution of YG11C/42CrMo Joint Brazed with BCu64MnNi Filler Metal. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, vol. 56, pp. 473–480. DOI: [10.1007/s11106-017-9918-0](https://doi.org/10.1007/s11106-017-9918-0).
  14. Yin Xiaohui, Ma Qunshuang, Cui Bing, Zhang Lei, Xue Xingyan, Zhong Sujuan, Xu Dong. Current review on the research status of cemented carbide brazing: filler materials and mechanical properties. *Metals and Materials International*, 2021, vol. 27, pp. 571–583. DOI: [10.1007/s12540-020-00608-w](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00608-w).
  15. Amelzadeh M., Mirsalehi S.E. Influence of braze type on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/steel dissimilar joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 36, pp. 450–458. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.10.015).
  16. Jiang Chao, Chen Hui, Zhao Xu, Qui Sifu, Han Dengquan, Gou Guoqing. Microstructure and mechanical properties of brazing bonded WC-15Co/35CrMo joint using AgNi/CuZn/AgNi composite interlayers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, vol. 70, pp. 1–8. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2017.08.021](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.08.021).
  17. Levin D.O., Sulitsin A.V., Usov D.A., Shevchenko K.A., Strugov S.S., Brusnitsyn S.V. Influence of iron and silicon on corrosion resistance brass. *Liteynoe proizvodstvo*, 2023, no. 12, pp. 22–27. EDN: [Y TNIUR](https://ytniur.com).
  18. Cheng Zhi, Huang Jihua, Ye Zheng, Yang Jian, Chen Shuhai. Butt brazing of titanium alloys/stainless steel plates by MIG-TIG double-sided arc welding process with copper filler metal. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1566–1570. DOI: [10.1016/j.jmrt.2018.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.009).
  19. Koltsov A., Bailly N., Cretteur L. Wetting and laser brazing of Zn-coated steel products by Cu–Si filler metal. *Journal of materials science*, 2010, vol. 45, no. 8, pp. 2118–2125. DOI: [10.1007/s10853-009-3949-y](https://doi.org/10.1007/s10853-009-3949-y).
  20. Suga T., Murai Ya., Kobashi T., Ueno K., Shindo M., Kanno K., Nakata K. Laser brazing of dissimilar joint of austenitic stainless steel and pure copper. *Welding International*, 2016, vol. 30, no. 3, pp. 166–174. DOI: [10.1080/09507116.2014.921090](https://doi.org/10.1080/09507116.2014.921090).
  21. Ryabukhin A.G., Gruba O.N. Enthalpy of formation of silicides of 3D elements of the periodic system of D.I. Mendeleev. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika*, 2007, no. 3, pp. 74–82. EDN: [K YSTEJ](https://kyste.j).

## The influence of silicon content on the structure of Cu55Ni6Mn4Zn brazing alloy and on the structure and properties of brazed joints

**Igor N. Pashkov**<sup>1,3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair No.1101

**Magomed R. Gadzhiev**<sup>\*1,4</sup>, postgraduate student

**Stanislav A. Tavalzhanskiy**<sup>2,5</sup>, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Foundry Technologies and Material Art Working”

**Tatiana A. Bazlova**<sup>2,6</sup>, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Foundry Technologies and Material Art Working”

**Vyacheslav E. Bazhenov**<sup>2,7</sup>, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Foundry Technologies and Material Art Working”

**Diana A. Katanaeva**<sup>2</sup>, graduate student

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow (Russia)

<sup>2</sup>University of Science and Technology MISIS, Moscow (Russia)

\*E-mail: maga.2630@gmail.com

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2511-2845>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1922-6635>

<sup>5</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6062-397X>

<sup>6</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9517-5871>

<sup>7</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-1935>

Received 24.06.2024

Revised 12.12.2024

Accepted 06.03.2025

**Abstract:** Cu55Ni6Mn4Zn (MNMts55-6-4) copper-zinc alloy is widely used for brazing hard-alloy tools and steels. However, the presence of silicon in the alloy (0.1–0.4 wt. %) can lead to the formation of brittle silicides of iron, nickel,

and manganese, which negatively influences the strength of brazed joints. The purpose of the study was to determine the influence of the quantitative content of silicon in copper-zinc brazing alloy doped jointly with nickel and manganese on the structure of brazing alloy blanks before brazing and the structure and properties of brazed joints. In the work, to study the distribution of silicides in ingots, tapes, and brazed seams, the authors used microstructural analysis methods, including electron microscopy and X-ray spectral microanalysis. The results showed that with a silicon content of up to 0.2 wt. %, silicides form finely dispersed inclusions uniformly distributed throughout the seam. However, with an increase in the silicon content to 0.4 wt. %, the formation of continuous layers of iron silicides along the brazing alloy – steel boundary is observed, which leads to brittle failure of the joints under mechanical loads. The influence of small gaps turned out to be especially critical during brazing, where the formation of large crystals of iron silicides significantly reduces the strength of the joints. The scientific novelty of the work lies in identifying the optimal silicon content in the alloy (no more than 0.2 wt. %) to minimize the negative effect of silicides on the properties of brazed joints. The results obtained can be used to develop process recommendations for the production of brazing alloys and brazing of steels, which will allow improving the reliability and durability of brazed joints under production-line conditions.

**Keywords:** brazing of hard-alloy tools; Cu55Ni6Mn4Zn (MNMts55-6-4); influence of silicon on brazed joints; iron silicides in brazed seams; brazed seam microstructure; embrittlement of brazed joints; optimization of brazing alloy composition.

**For citation:** Pashkov I.N., Gadzhiev M.R., Tavolzhanskiy S.A., Bazlova T.A., Bazhenov V.E., Katanaeva D.A. The influence of silicon content on the structure of Cu55Ni6Mn4Zn brazing alloy and on the structure and properties of brazed joints. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 1, pp. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-4.