

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья
УДК 621.791.14:62-97
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/75-83>

**Водоохлаждаемый инструмент для сварки трением
с перемешиванием**

Владимир Николаевич Стаценко✉, **Константин Владимирович Бернавский**

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация,

✉ vladsta@mail.ru

Аннотация. Инструмент для сварки трением с перемешиванием закрепляется в патроне специализированного станка. После включения вращения инструмента и начала процесса сварки через входной патрубок подаётся охлаждающая вода на рабочие лопасти инструмента, которые при вращении инструмента аналогично действию центробежного насоса под действием центробежных сил нагнетают воду в спиралевидный канал и затем – в выходной патрубок. При этом вода охлаждает лопасти и внутреннюю часть заплечика. Расчётные исследования показывают, что при увеличении необходимого снижения температуры рабочей поверхности заплечика отводимая к охлаждающей воде тепловая мощность повышается, с уменьшением толщины заплечика это повышение происходит более значительно. При необходимом снижении температуры на 200 °С при толщине заплечика $\delta = 20$ мм расход воды должен составлять 0,25 г/с, при толщине $\delta = 5$ мм этот расход повышается до 0,6 г/с. При необходимом снижении температуры на 400 °С при толщине заплечика $\delta = 20$ мм расход воды пропорционально повышается до 0,75 г/с, при толщине $\delta = 5$ мм этот расход увеличивается до 1,7 г/с.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, инструмент, охлаждение, температура заплечика, тепловая мощность, толщина заплечика, расход воды

Для цитирования: Стаценко В.Н., Бернавский К.В. Водоохлаждаемый инструмент для сварки трением с перемешиванием // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 75–83.

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR
AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Original article

Water cooled friction stir welding tool

Vladimir N. Statsenko✉, **Konstantin V. Bernavsky**

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,

✉ vladsta@mail.ru

Abstract. The friction stir welding tool is fixed in the chuck of a specialized machine. After the tool rotation is switched on and the welding process begins, cooling water is supplied to the tool working blades through the inlet pipe, which, when the tool rotates, similarly to the action of a centrifugal pump, under the action of centrifugal forces, pump water into the spiral channel and then into the outlet pipe. In this case, the water cools the blades and the inner part of the shoulder. Calculation studies show that with an increase in the required decrease in the temperature of the shoulder working surface, the thermal power transferred to the cooling water increases, with a decrease in the shoulder thickness this increase is more significant. With the required temperature decrease by 200 °C with a shoulder thickness of $\delta = 20$ mm, the water consumption should be 0,25 g/s,

with a thickness of $\delta = 5$ mm this consumption increases to 0,6 g/s. With the required temperature reduction by 400°C at a shoulder thickness of $\delta = 20$ mm, the water consumption increases proportionally to 0,75 g/s, at a thickness of $\delta = 5$ mm, this consumption increases to 1,7 g/s.

Keywords: friction stir welding, tool, cooling, shoulder temperature, thermal power, shoulder thickness, water consumption

For citation: Statsenko V.N., Bernavsky K.V. Water cooled friction stir welding tool. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 75–83. (In Russ.).

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является достаточно новой технологией, реализованной в современном виде в 1991 г. [1]. Этот способ сварки стал широко использоваться в разных областях промышленности для соединения сплавов, плохо свариваемых традиционными способами (алюминиевые сплавы, содержащие цинк, медь, литейные сплавы магния).

Специальный инструмент состоит из заплечика и рабочего выступа – пина [1]. Вращающийся инструмент закрепляют в шпинделе специализированного станка, включают вращение инструмента и медленно погружают его встык свариваемых пластин до тех пор, пока заплечик инструмента не углубится на 0,2–0,3 мм в основной металл. Включается продольное перемещение инструмента вдоль стыка со скоростью сварки, в результате трения пина и заплечика о заготовку выделяется теплота, которая доводит металл вокруг инструмента до пластифицированного состояния. При перемещении инструмента происходит перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва.

Качество сварного соединения зависит от степени перемешивания пластифицированных кромок свариваемых деталей, которая, в свою очередь, зависит от температуры размягчённого металла. Эту температуру можно получить разными сочетаниями скоростей вращения инструмента, перемещения (сварки), силы прижатия инструмента.

Таблица 1 / Table 1

Цвета каления
Incandescence colors

Температура, °C	Цвет каления	Цвет
800	ярко- или светло-вишнёвый	
850	ярко- или светло-красный	
900	ярко-красный	
950	оранжевый	
1000	жёлтый	
1100–1150	ярко- или светло-жёлтый	
1200	жёлто-белый	
1300 и более	белый	

Для сварки алюминиевых сплавов методом СТП достаточно температуры кромок свариваемых пластин 500–550°C [6], магниевых – 450–520°C, медных – 750–850°C. При этом температура инструмента может достигать значений на 100–150°C выше. Для сварки медных сплавов (рис. 1) температуру инструмента можно оценить по цвету каления (табл. 1), она может составлять 900–950°C.

При этих температурах резко увеличивается износ инструмента, сокращается его ресурс. Для улучшения этих характеристик инструмента используются термостойкие стали и сплавы (табл. 2), обычно достаточно редкие и дорогостоящие. В особенных условиях этого ресурса может быть достаточно для выполнения нескольких метров сварного шва.



Рис. 1. Сварка трением с перемешиванием пластин из медного сплава

Fig. 1. Friction stir welding of copper alloy plates

Таблица 2 / Table 2

Материал инструмента [2]

Tool material [2]

Сплав	Толщина (мм)	Материал инструмента
Алюминиевые сплавы	< 12	Инструментальная сталь, WC-Co*
	< 26	MP159 (никель-кобальтовый сплав)
Магниеые сплавы	< 6	Инструментальная сталь, WC**
Медь и медные сплавы	< 50	Никелевые сплавы, вольфрамовые сплавы, поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ)
	< 11	Инструментальная сталь
Титановые сплавы	< 6	Вольфрамовые сплавы
Нержавеющие стали	< 6	ПКНБ, вольфрамовые сплавы
Низколегированные стали	< 10	WC, ПКНБ
Никелевые сплавы	< 6	ПКНБ

* WC-Co – композиционный материал, карбид вольфрама на кобальтовой матрице

** WC – карбид вольфрама

Используемые технические решения

Для уменьшения износа инструмента и увеличения его ресурса применяется жидкостное (водяное) охлаждение инструмента.

Одним из известных устройств по охлаждению инструмента для сварки трением с перемешиванием является система гравитационной тепловой трубы [3]. Инструмент имеет цилиндрический корпус с внутренней полостью, имеющей форму усеченного конуса с основанием большего диаметра в горячей зоне (зоне испарения хладагента) и меньшего диаметра в зоне охлаждения (зоне конденсации паров хладагента). Корпус инструмента снаружи в зоне конденсации имеет охлаждение проточной жидкостью, подаваемой принудительным способом.

В рабочем состоянии при вращении инструмента рабочая поверхность заплечика нагревается, хладагент во внутренней полости в горячей зоне испаряется, его пар поступает в верхнюю часть полости в зону охлаждения, конденсируется и затем в виде плёнки стекает по конусной стенке в нижнюю часть инструмента обратно в горячую зону (рис. 2а), т.е. происходит замкнутая циркуляция хладагента через зоны нагрева и охлаждения.

Недостатки этого устройства:

1. В инструментах для сварки трением с перемешиванием диаметр заплечика имеет обычно размер 20–25 мм. К инструменту приложена значительная нагрузка в виде крутящего момента и силы его прижатия к свариваемым деталям. Следовательно, стенки внутренней полости должны иметь значительную толщину, соответственно, эта полость будет иметь неболь-

шие размеры и объём, в котором разместится всего 2–3 мл хладагента. Для переноса достаточного количества теплоты этого количества хладагента явно недостаточно.

2. Сложная система принудительного жидкостного охлаждения наружной поверхности верхней части корпуса вращающегося инструмента (на схеме не указано), что приводит к протечкам жидкости и негативному влиянию на температурный режим в зоне сварки деталей.

Другим устройством охлаждения является инструмент с цилиндрической полостью (1), в которой по внутренней цилиндрической поверхности по всей высоте выполнены винтовые канавки (2), при этом направление канавок выбрано таким образом, чтобы при вращении инструмента охлаждающая жидкость за счёт центробежных сил прижималась к стенкам канавок и по канавкам поднималась вверх [4]. Для повышения эффективности теплоотвода в верхней части цилиндрического корпуса на его внешней стороне установлены рёбра (3), выполняющие функцию радиатора (рис. 2b).

Недостатки этого устройства:

1. Винтовые канавки при вращении инструмента предназначены для перекачивания потока хладагента из горячей зоны в верхнюю часть корпуса. Однако в тексте также указано, что полость внутри инструмента заполнена охлаждающим быстроиспаряющимся хладагентом. Непонятно, жидкость перемещается вверх по канавкам или испаряется. Если жидкость всё-таки перемещается по канавкам вверх, то как она возвращается назад в нижнюю часть инструмента (канал для прохода) – не указано. По схеме, видимо, вся жидкость при вращении поднимается по канавкам вверх и процесс охлаждения прекращается.

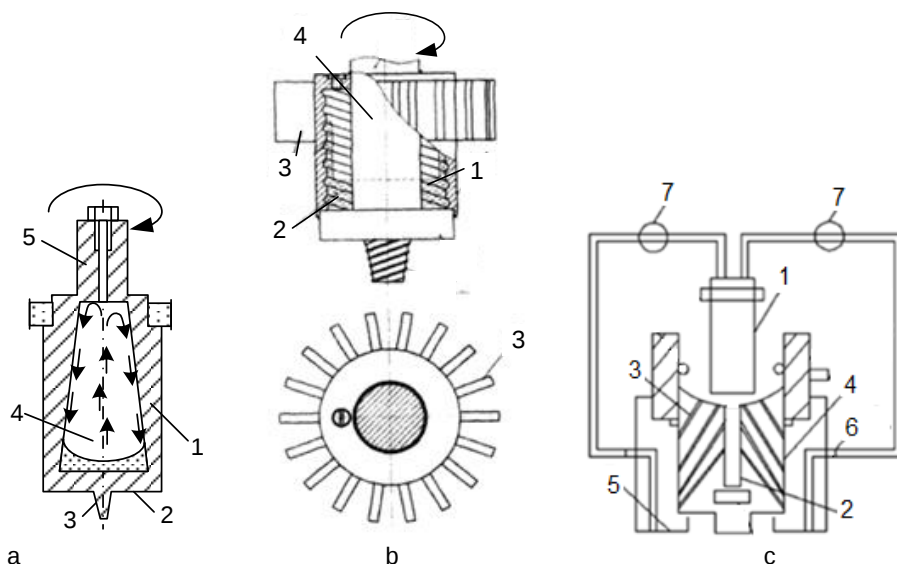


Рис. 2. Системы охлаждения инструмента для сварки трением с перемешиванием

Fig. 2. Cooling systems for friction stir welding tools

1. В инструментах для сварки трением с перемешиванием диаметр заплечика имеет обычно размер 20–25 мм. Диаметр хвостовика должен иметь значение не менее 10 мм, чтобы передать на заплечик и пин крутящий момент и осуществить значительное прижатие его к свариваемым деталям. Тогда зазор между корпусом с винтовыми канавками (2) и хвостовиком (4) будет иметь значение 2–3 мм. В этом случае объём заливаемого в полость инструмента охлаждающего хладагента должен составлять всего 2–3 мл. Для переноса достаточного количества теплоты этого количества хладагента явно недостаточно.

2. И основное. При высоких температурах заплечика при сварке (при сварке наиболее низкотемпературных алюминиевых сплавов температура под заплечиком может достигать значений 520–550°C) охлаждающий хладагент, скорее всего, мгновенно вскипит с образованием пара высокого давления. Передача теплоты через пар и теплопроводностью, и конвекцией ниже, чем через жидкость, примерно в 10–100 раз. Соответственно, процесс охлаждения заплечика в этом случае резко снижается.

Проточная схема охлаждения инструмента для сварки трением с перемешиванием реализована в системе, представленной в [5]. Хладагент принудительно через распылитель (1) направляется в коллектор (2) и несколько каналов (3) внутри тела инструмента (4), охлаждает его, затем нагретый хладагент собирается в кольцевом сборнике жидкости (5) вокруг вращающегося инструмента (4). Из сборника (5) хладагент по трубкам (6) снова принудительно нагнетателем (7) направляется через распылитель (1) в коллектор (2) и каналы (3) охлаждения инструмента (4).

Недостатки этого устройства:

1. Отсутствует система охлаждения хладагента, что приводит к постепенному повышению температуры хладагента и снижению качества охлаждения.
2. Большое количество каналов внутри инструмента нарушает его прочность.
3. Непонятна система подвода силы прижатия инструмента к свариваемым деталям и организация подвода к инструменту крутящего момента. Эти факторы являются главенствующими в технологии сварки трением с перемешиванием.

Предлагаемое техническое решение

Для уменьшения износа инструмента и увеличения его ресурса предлагается применить жидкостное (водяное) охлаждение инструмента со стороны, обратной рабочей поверхности заплечика.

Сущность нашего предложения заключается в использовании проточной схемы охлаждения инструмента, которая представлена на рис. 3. Водоохлаждаемый инструмент с заплечиком (1) и рабочей поверхностью (2), пином (3), приводным валом (4) и хвостовиком (5) закрепляется в патроне станка (на схеме не указано). Заплечик (1) имеет круговой паз (6) и внутреннюю часть (7) с рабочими лопатками (8). Рабочий инструмент помещён в корпус (9), который имеет патрубок (10) входа жидкости, внутреннюю полость (11) для прохода охлаждающей жидкости, спиралевидный канал (12) выхода жидкости за лопатками (8) и патрубок (13) выхода жидкости, корпус со стороны рабочей поверхности инструмента закрыт крышкой (14), входящей в круговой паз (6), крышка (14) скрепляется с корпусом (9) болтовым соединением (15) через прокладку (16) и отверстия (17). Корпус со стороны хвостовика (5) приводного вала (4) закрыт сальниковым уплотнением, состоящим из нажимной втулки (18) с резьбой (19) и сальниковой мягкой набивки (20), для закрепления корпуса используется кронштейн (21).

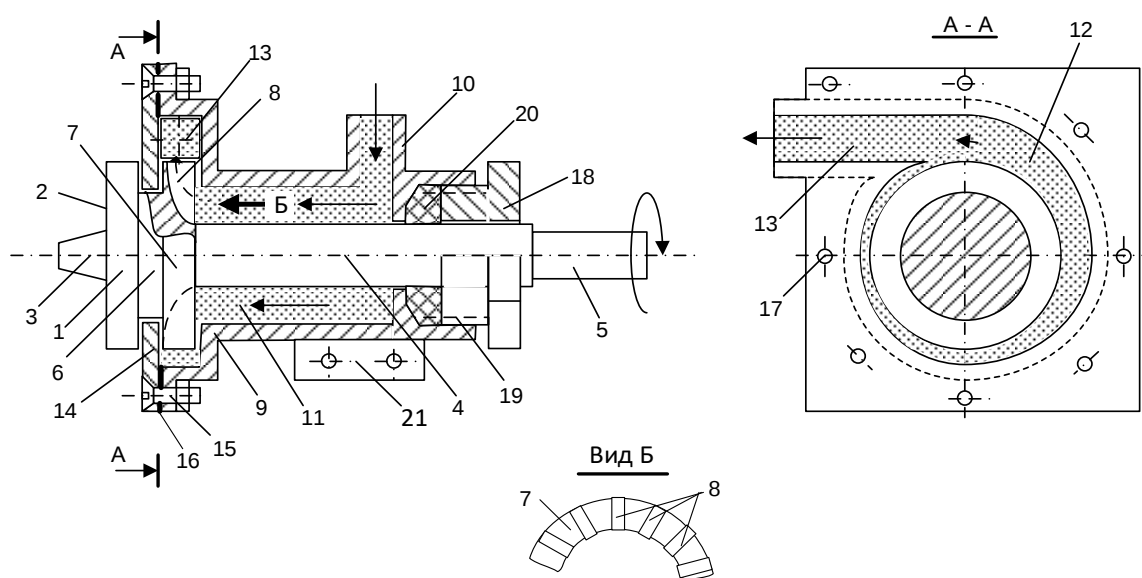


Рис. 3. Устройство водоохлаждаемого инструмента для сварки трением с перемешиванием

Fig. 3. Water-cooled tool design for friction stir welding

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

Инструмент для сварки трением с перемешиванием закрепляется хвостовиком (5) в патроне специализированного станка. Корпус инструмента (9) через кронштейн (21) закрепляется неподвижно относительно устройства привода патрона станка (не указано). После включения вращения инструмента и начала процесса сварки в патрубок (10) подаётся охлаждающая вода, которая проходит по внутренней полости (11) и поступает в рабочие лопатки (8), которые при вращении инструмента аналогично действию центробежного насоса под действием центробежных сил нагнетают воду в спиралевидный канал (12) и затем – в выходной патрубок (13). При этом при контакте с лопатками (8) и внутренней частью заплечика (7) вода охлаждает эти поверхности и интенсивно нагревается до температуры 90°C , эта температура ограничивает возможность вскипания воды при давлении около 100 кПа.

Особенностью этой схемы является наличие эффекта эжекции при струйном движении воды из рабочих лопаток (8) в спиралевидный канал (12), при котором происходит подсос воздуха через щель между круговым пазом (6), внутренней частью заплечика (7) и крышкой (14). При этом исключаются протечки охлаждающей воды на заплечик (1) и его рабочую часть (2), что не влияет на процесс сварки.

Расчётное исследование теплообмена в инструменте

При исследовании точечной сварки трением с перемешиванием авторами получены зависимости удельного тепловыделения на инструменте от его угловой скорости вращения при обработке алюминиевого сплава АМг3 (рис. 4а) [6]. Для инструмента с диаметром заплечика 20 мм при угловой скорости его вращения $\omega = 100 \text{ c}^{-1}$ тепловыделение может составлять $Q = 0,75 \text{ кВт}$.

Авторами проведены расчётные исследования теплообмена при охлаждении водой заплечика вращающегося инструмента. Упрощённая расчётная схема теплообмена между рабочей поверхностью заплечика с температурой t_3 и охлаждающей водой с температурами t_{B1} на входе и t_{B2} на выходе приведена на рис. 4б.

В расчётах назначена температура воды на входе $t_{B1} = 20^{\circ}\text{C}$, температура воды на выходе $t_{B2} = 90^{\circ}\text{C}$ принята из условия исключения вскипания воды в результате нагрева. Кроме этого, задавались несколькими значениями величины снижения температур рабочей поверхности заплечика (в диапазоне $\Delta t_3 = 100\text{--}500^{\circ}\text{C}$), а также несколькими значениями толщин заплечика ($\delta = 5, 10, 15$ и 20 мм), материал заплечика выбран в виде инструментальной стали с коэффициентом теплопроводности $\lambda_3 = 0,06 \text{ кВт/м}\cdot\text{K}$.

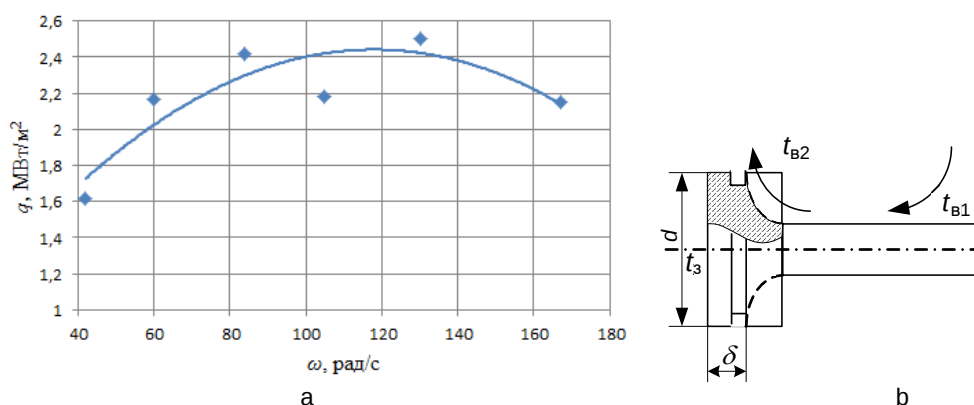


Рис. 4. Удельное тепловыделение на инструменте (а), упрощённая расчётная схема теплообмена (б)

Fig. 4. Specific heat generation on the tool (a), simplified heat exchange calculation scheme (b)

Коэффициент теплоотдачи от вращающейся поверхности заплечика к воде с температурой t_{B2} рассчитаны по критериальным зависимостям [7, 8] (при $Re < 3 \cdot 10^3$):

$$Nu = 0,62Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33},$$

$$Re = \frac{\omega \cdot (d/2)^2}{\nu_B},$$

$$Nu = \frac{\alpha(d/2)}{\lambda_B},$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{(d/2)},$$

где ω – угловая скорость вращения заплечика, с^{-1} ;
 ν_B ($\text{м}^2/\text{с}$), λ_B ($\text{кВт}/\text{м} \cdot \text{К}$) – коэффициенты кинематической вязкости и теплопроводности воды при температуре t_{B2} ;
 α – коэффициент теплоотдачи, $\text{кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;
 Pr – критерий Прандтля для воды при температуре t_{B2} ;
 Nu – критерий Нуссельта.

Результаты расчёта коэффициента теплоотдачи в зависимости от угловой скорости вращения заплечика представлены на рис. 5а. В расчётах коэффициент теплоотдачи выбран для скорости вращения заплечика $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ – $\alpha = 8,4 \text{ кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Коэффициент теплопередачи от рабочей поверхности заплечика к охлаждающей воде с температурой $t_{B2} = 90^\circ\text{C}$ рассчитан по зависимости [8]:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}}, \text{ кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Результаты расчёта коэффициента теплопередачи в зависимости от толщины заплечика представлены на рис. 5б.

В расчётах рассматривается изменение характеристик теплообмена при изменении температуры рабочей поверхности заплечика от значения t_{31} до t_{32} . Соответствующее изменение удельного теплового потока через стенку заплечика от рабочей поверхности к охлаждающей воде рассчитывается по зависимости:

$$q = k(t_{31} - t_{B2}) - k(t_{32} - t_{B2}) = k(t_{31} - t_{32}), \text{ кВт}/\text{м}^2,$$

а изменение тепловой мощности, отводимой на нагрев воды (и охлаждение заплечика), рассчитывается по зависимости:

$$Q = q \cdot S, \text{ кВт},$$

где $S = \pi \cdot d^2/4$ – площадь рабочей поверхности заплечика, м^2 ;
 d – диаметр заплечика, м.

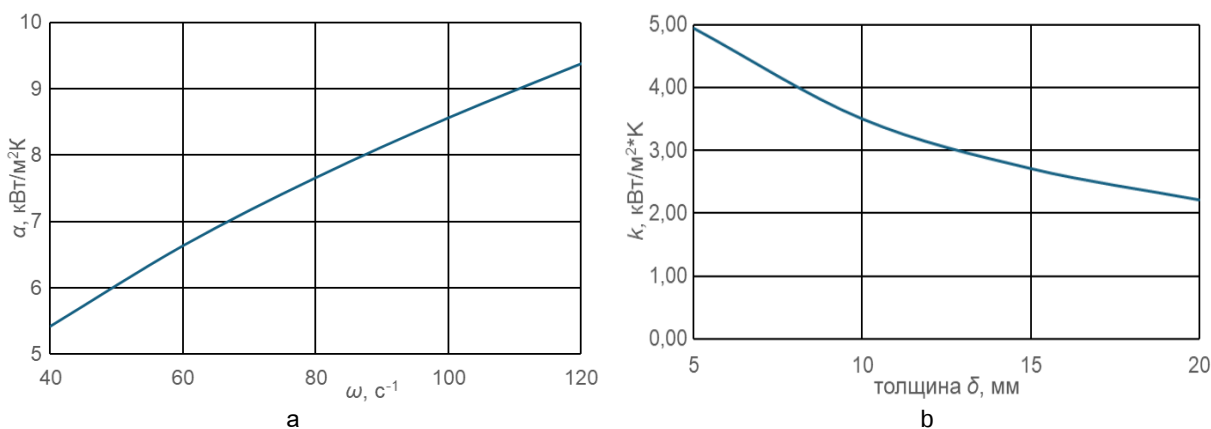


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости вращения заплечика, $d = 0,02$ м (а), и коэффициента теплопередачи от толщины заплечика (б)

Fig. 5. Dependences of the heat transfer coefficient on the rotation speed of the shoulder, $d=0.02$ m (a), and the heat transfer coefficient on the thickness of the shoulder (b)

Результаты расчёта тепловой мощности, отводимой через заплечик, в зависимости от необходимого снижения температуры его рабочей поверхности Δt_3 представлены на рис. 6а.

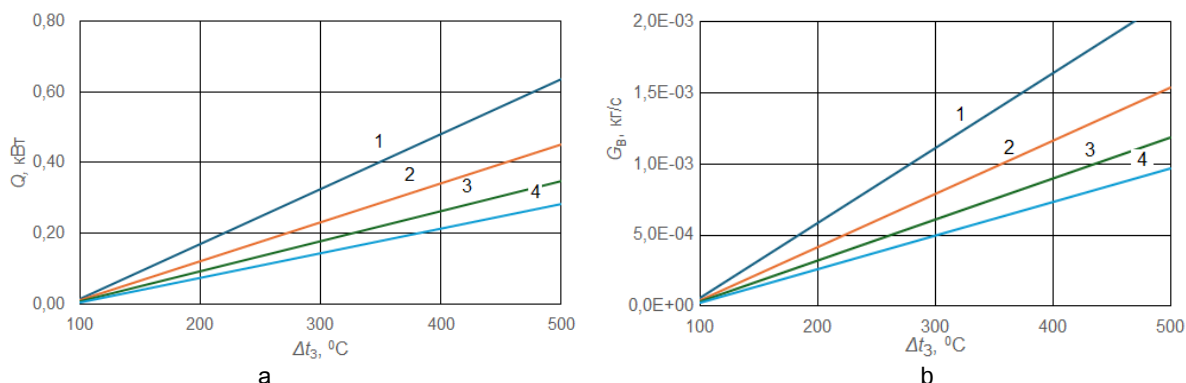
Из этого значения находится изменение расхода охлаждающей воды:

$$G_B = Q / (c_p \cdot \Delta t_B), \text{ кг/с},$$

где $c_p = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ – теплоёмкость воды;

$\Delta t_B = t_{B2} - t_{B1} = 70^\circ\text{C}$ – разница температур охлаждающей воды на выходе и входе.

Результаты расчёта зависимости изменения расхода охлаждающей воды от величины снижения температуры на рабочей поверхности заплечика при разной его толщине представлены на рис. 6б.



**Рис. 6. Изменение тепловой мощности на охлаждение заплечика (а), расход воды (б) от величины снижения температуры рабочей поверхности заплечика, $c_p = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda_3 = 0,06 \text{ кВт/м}\cdot\text{К}$, $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,02 \text{ м}$:
1 – $\delta = 5 \text{ мм}$, 2 – $\delta = 10 \text{ мм}$, 3 – $\delta = 15 \text{ мм}$, 4 – $\delta = 20 \text{ мм}$**

Fig. 6. Change in thermal power for cooling the shoulder (a), water consumption (b) from the value of the temperature decrease of the working surface of the shoulder,

$c_p = 4.19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, $\lambda_3 = 0.06 \text{ kW/m}\cdot\text{K}$, $\omega = 100 \text{ s}^{-1}$, $d = 0.02 \text{ m}$:
1 – $\delta = 5 \text{ mm}$, 2 – $\delta = 10 \text{ mm}$, 3 – $\delta = 15 \text{ mm}$, 4 – $\delta = 20 \text{ mm}$

Закключение

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении необходимого снижения температуры рабочей поверхности заплечика отводимая к охлаждающей воде тепловая мощность повышается, с уменьшением толщины заплечика это повышение происходит более значительно. При необходимом снижении температуры на 200°C при толщине заплечика $\delta = 20 \text{ мм}$ расход воды должен увеличиться на $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$, при толщине $\delta = 5 \text{ мм}$ этот расход повышается на $6 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$. При необходимом снижении температуры на 400°C при толщине заплечика $\delta = 20 \text{ мм}$ расход воды пропорционально повышается на $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, при толщине $\delta = 5 \text{ мм}$ этот расход увеличивается на $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Н. Стаценко – постановка задач исследования, разработка методики расчётов, оформление статьи; К.В. Бернавский – анализ литературных источников, расчётные исследования, редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.N. Statsenko – formulation of research problems, processing of experimental results, preparation of the article; K.V. Bernavsky – analysis of literary sources, analysis and interpretation of results, preparation and editing of text. All authors read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stirs butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. № 10. С. 25–32.
3. Штрикман М.М. Инструмент для фрикционной сварки перемешиванием // Патент на изобретение № RU 2517653, заявка № 2012155481/02, приоритет от 20.12.2012, дата регистрации 27.05.2014 г.
4. Албагачиев А.Ю., Прохорович В.Е., Михеев А.В., Абубакиров А.В. Самоохлаждающийся инструмент для сварки трением с перемешиванием расплава свариваемых деталей // Патент на изобретение № RU 216182, заявка № 2022126473, приоритет от 11.12.2017, дата регистрации 20.01.2023 г.
5. Circulating water cooling stirring friction welding device // Патент на изобретение № 201711307038.3, Китай, заявка № 108015406, приоритет от 11.12.2017, дата регистрации 11.05.2018 г.
6. Стаценко В.Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 120 с. DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
7. Степыгин В.И., Фурсов В.М. К расчёту теплоотдачи от вращающихся дисковых поверхностей // Известия вузов. Пищевая технология. 1990. № 4. С. 10–11.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Москва: Энергия, 1975. 488 с.

REFERENCES

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stirs butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.
2. Shtrikman M.M. Status and development of the process of friction welding of linear joints. *Welding production*, 2007, no. 10, pp. 25–32. (In Russ.).
3. Shtrikman M.M. Tool for friction stir welding // Patent for invention. No. RU 2517653, application No. 2012155481/02, priority from 20/12/2012, registration date 27/05/2014. (In Russ.).
4. Albagachiev A.Yu., Prokhorovich V.E., Mikheev A.V., Abubakirov A.V. Self-cooling tool for friction stir welding of welded parts // Patent for invention. No. RU 216182, application No. 2022126473, priority dated 12/11/2017, registration date 01/20/2023. (In Russ.).
5. Circulating water cooling stirring friction welding device // Patent for invention. No. 201711307038.3, China, application No. 108015406, priority dated 12/11/2017, registration date 05/11/2018.
6. Statsenko V.N. Thermal processes in friction stir welding. Vladivostok, Publishing House of FEFU, 2021. 120 p. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>
7. Stepygin V.I., Fursov V.M. On the calculation of heat transfer from rotating disk surfaces. *News of higher education institutions. Food technology*, 1990, no. 4, pp. 10–11. (In Russ.).
8. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Textbook for higher education institutions. Moscow: Energiya, 1975. 488 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Стаценко Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vladsta@mail.ru

Vladimir N. Statsenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Бернавский Константин Владимирович – магистрант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

✉ bernavsky@mail.ru

Konstantin V. Bernavsky, Postgraduate Student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 07.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 06.06.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.