

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 625.12:539.4

А. Б. Красюк,

канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ ТОЛЩИН ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОБЩУЮ ПРОЧНОСТЬ КОРПУСА СУДНА

INFLUENCE OF ERRORS IN THE DETERMINATION OF THE RESIDUAL THICKNESS OF ELEMENTS OF HULL STRUCTURES ON THE TOTAL STRENGTH OF THE SHIP'S HULL

Рассматривается влияние погрешностей в определении остаточных толщин листовых элементов корпуса судна и балок судового набора на изменение предельного момента и коэффициента запаса прочности изношенного корпуса судна.

This article analyzes the impact of the errors in the determination of residual thickness of the sheet metal elements, girders and stiffeners on the variation of limiting bending moment and safety factor of the worn ship's hull.

Ключевые слова: судно, корпус, местная прочность, общая прочность, остаточная толщина, напряжения, деформации.

Key words: ship, ship's hull, local strength, total strength, the residual thickness, stress, deformation.

В КАЧЕСТВЕ показателей прочности элементов корпусных конструкций и всего корпуса судна могут быть использованы такие характеристики, как максимальные напряжения, предельные нагрузки, разрушающие нагрузки, предельный момент корпуса, коэффициенты запаса.

Уменьшение толщины элементов конструкции корпуса снижает показатели его общей и местной прочности. Это уменьшение толщин учитывается коэффициентом запаса прочности, он включает износ элементов конструкций и перекал листового и профильного проката, из которого изготовлены элементы конструкции корпуса, то есть несоответствие толщин элементов указанным в проектных документах.

Допускаемую погрешность в определении остаточных толщин определяют из условия, что точность инженерных расчетов должна обеспечить отклонения результатов, не превосходящие 5 %.

Прочностные характеристики корпуса судна в целом зависят от прочностных характеристик входящих в него элементов — листов обшивки и настилов и балок набора. Следовательно, изменение прочностных характеристик пластин и балок набора, вызванное погрешностями измерения остаточных толщин последних, окажет влияние и на прочность всего корпуса, и прежде чем рассмотреть вопрос, касающийся влияния погрешностей измерения остаточных толщин на прочность всего корпуса, следует выполнить анализ влияния погрешностей на пластины и балки набора. Анализ результатов влияния погрешностей измерения остаточных толщин на пластины и балки набора выполнен В. Б. Чистовым, А. Б. Красюк и М. Г. Пеликовой [7; 8].

Погрешности в определении остаточной толщины, особенно элементов крайних связей эквивалентного бруса, могут повлиять на показатели общей прочности корпуса судна, предельный изгибающий момент или коэффициент запаса общей прочности. Методика проверки общей прочности корпусов судов с износами и деформациями их элементов дается в Правилах освидетель-

ствования судов в эксплуатации (ПОСЭ) Речного регистра [3]. Следует отметить, что изменение толщины крайней связи эквивалентного бруса в средней части дважды влияет на изменение показателей общей прочности корпуса. С одной стороны, толщина элемента корпуса непосредственно используется при определении геометрических характеристик сечения корпуса. С другой стороны, необходимо учитывать, что в сжатой зоне (а при поперечной системе набора и в растянутой) пластины могут терять устойчивость и площадь поперечного сечения их при расчете геометрических характеристик сечения эквивалентного бруса засчитывается с редуцированным (уменьшающим) коэффициентом, который, в свою очередь, зависит от остаточной толщины пластины. Методика расчета редуцированных коэффициентов пластин дается в Правилах постройки судов внутреннего плавания (ПСВП) Речного регистра [4]. Учет редуцирования пластин существенно усложняет задачу установления влияния погрешностей в определении остаточной толщины на показатели общей прочности.

Изменение предельного момента и коэффициента запаса прочности изношенного корпуса судна

Влияние погрешности определения остаточной толщины листов наружной обшивки на показатели общей прочности корпуса (предельный момент и коэффициент запаса прочности) выясним, используя методику проверки общей прочности корпусов судов с износами и деформациями, изложенную в Приложении к ПОСЭ (Правила освидетельствования судов в эксплуатации) [3]. Общая прочность корпуса обеспечена, если

$$M_{\text{пр}} \geq k_{\text{годн}} \cdot M_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{пр}}$ — предельный момент корпуса, определяемый с учетом износов и остаточных деформаций для прогиба и перегиба по абсолютной величине;

$k_{\text{годн}}$ — коэффициент запаса общей прочности для годной оценки технического состояния;

$M_{\text{р}}$ — расчетный изгибающий момент при прогибе и перегибе, взятый по модулю.

Предельный момент корпуса в эксплуатации вычисляется по формуле

$$M_{\text{пр.экс}} = 10^3 \cdot W_{\text{пр.экс}} \cdot \sigma_{\text{оп}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{пр.экс}}$ — момент сопротивления рассматриваемого сечения корпуса, определенный с учетом имеющихся в связях в данный момент времени остаточных толщин и параметров деформаций в этом сечении в предположении, что в одной из точек сечения напряжения равны опасным относительно этой связи, м^3 ;

$\sigma_{\text{оп}}$ — опасное напряжение в указанной связи, принимаемое равным:

— для связей, не несущих местной нагрузки:

$$\sigma_{\text{оп}} = k_{\text{н}} \cdot R_{\text{ен}};$$

— для связей, несущих местную нагрузку:

$$\sigma_{\text{оп}} = 0,9k_{\text{н}} \cdot R_{\text{ен}};$$

где $R_{\text{ен}}$ — предел текучести материала, МПа;

$$k_{\text{н}} = 1 - 0,089 \left(\frac{R_{\text{ен}}}{235} - 1 \right) - 0,129 (R_{\text{ен}}/235 - 1)^2$$

при $235 \text{ МПа} \leq R_{\text{ен}} \leq 390 \text{ МПа}$.

Если учитывается погрешность в определении остаточной толщины продольных связей, то относительное изменение предельного момента будет

$$\frac{M_{\text{пр}} - M_{\text{пр}}^*}{M_{\text{пр}}} = \frac{10^3 W_{\text{пр.экс}} \cdot \sigma_{\text{оп}} - 10^3 W_{\text{пр.экс}}^* \cdot \sigma_{\text{оп}}}{10^3 W_{\text{пр.экс}} \sigma_{\text{оп}}}, \quad (3)$$

где $M_{пр}^*$ — предельный момент, учитывающий, помимо ранее указанного, еще и погрешность в определении остаточной толщины связей;

$W_{пр.экс}^*$ — момент сопротивления, учитывающий, помимо ранее указанного, еще и погрешность в определении остаточной толщины продольных связей.

После сокращений и преобразований получим

$$\frac{\Delta M_{пр}}{M_{пр}} = \frac{\Delta W_{пр.экс}}{W_{пр.экс}}. \quad (4)$$

Для идеального несимметричного двутавра [8] отношение изменения момента сопротивления к моменту сопротивления поперечного сечения профиля равно отношению изменения площади крайней связи к площади этой крайней связи. Для нашего случая, когда мы стремимся получить относительное изменение характеристики прочности, такая идеализация поперечного сечения корпуса судна вполне приемлема, поэтому

$$\frac{\Delta M_{пр}}{M_{пр}} = \frac{\Delta F_1}{F_1}, \quad (5)$$

где F_1 — площадь сечения крайней связи эквивалентного бруса с учетом износов и деформаций;

ΔF_1 — изменение площади сечения крайней связи эквивалентного бруса из-за погрешностей в определении остаточной толщины этой крайней связи.

Для судов внутреннего и смешанного плавания площадь крайней связи, например днища, определяется с учетом редуцирования пластин наружной обшивки, поэтому при продольной системе набора ее следует определять по формуле

$$F_g = n \cdot a \cdot t \cdot \varphi^*, \quad (6)$$

где na — ширина крайней связи эквивалентного бруса (рис. 1, а), здесь: n — количество пластин в сечении днища; a — размер пластины по ширине судна; t — остаточная толщина пластины; φ^* — редуцирующий коэффициент всей пластины или уменьшение работоспособной площади всей крайней связи.

Принимая ширину присоединенного пояска жесткой части пластины равной половине ширины пластины, для продольной системы набора получим

$$\varphi^* = \frac{1 + \varphi}{2}, \quad (7)$$

где φ — редуцирующий коэффициент гибкой части пластины.

Редуцирующий коэффициент гибкой части сжатой пластины определяется по ПСВП (Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания) РРР [4]:

$$\varphi = \frac{\sigma_{кр}}{|\sigma_{ж}|}, \quad (8)$$

где $\sigma_{кр}$ — критические напряжения пластин, сжатых вдоль длинной кромки;

$|\sigma_{ж}|$ — абсолютное значение сжимающего напряжения в жестких связях, МПа, на уровне центра тяжести пластины.

Критические напряжения пластин, сжатых вдоль длинной кромки, МПа, вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{array}{ll} \sigma_{кр} = \sigma_y & \text{при} \\ \sigma_{кр} = (1,63 - 0,8\sqrt{R_{сН}/\sigma_y}) R_{сН} & \sigma_y \leq 0,6R_{сН} \\ \text{при} & 0,6R_{сН} < \sigma_y < 1,6R_{сН} \\ \sigma_{кр} = R_{сН} & \text{при} \end{array} \right\} \sigma_y \geq 1,6R_{сН} \quad (9)$$

где $\sigma_y = 78,5 \left(\frac{100t}{a} \right)^2$ — эйлеровы напряжения в пластине;

t — толщина пластины, см;

a — длина короткой кромки, см;

$R_{\text{ен}}$ — предел текучести материала.

Введем понятие минимальной толщины пластины, при которой она никогда не теряет устойчивости (t^*), даже когда вдоль ее длинной кромки будут действовать сжимающие напряжения, равные пределу текучести материала [6, с. 110–116]. Эта толщина будет определяться по формуле

$$t^* = \frac{a}{100} \sqrt{\frac{1,6R_{\text{ен}}}{78,5}}. \quad (10)$$

После преобразований получим более удобные выражения для редуцированных коэффициентов пластин при продольной системе набора:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{1,6}{n_1} \left(\frac{t}{t^*} \right)^2 \quad \text{при} \quad \frac{t}{t^*} \leq 0,612 \\ \varphi &= \frac{1,63}{n_1} - \frac{0,63}{n_1} \cdot \frac{t}{t^*} \quad \text{при} \quad 0,612 < \frac{t}{t^*} < 1,0 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где $n_1 = \frac{\sigma_{\text{ж}}}{R_{\text{ен}}}$ — уровень напряжений в жестких связях.

Такое представление редуцированных коэффициентов пластин удобно тем, что последние представляются зависящими только от отношения остаточной толщины пластины к минимальной, при которой она не теряет устойчивость. Выражения (11) представлены на графике (рис. 1, б).

Так как рассматривается относительное изменение площади поперечного сечения обшивки днища из-за погрешности определения ее остаточной толщины, то его можно определить по формуле

$$\frac{F_{\text{д}} - F_{\text{д}}^{\Pi}}{F_{\text{д}}} = \frac{n \cdot a \cdot t \cdot \varphi^* - n \cdot a (t - \Delta t) \varphi_n^*}{n \cdot a \cdot t \cdot \varphi^*}. \quad (12)$$

После преобразований и сокращений получим

$$\frac{\Delta F_{\text{д}}}{F_{\text{д}}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{t} \right) \frac{\varphi_n^*}{\varphi^*}, \quad (13)$$

где φ_n^* — редуцированный коэффициент пластины, толщина которой равна остаточной с учетом погрешности в ее определении.

Если днище является лимитирующей связью, то есть в нем сжимающие напряжения достигают $\sigma_{\text{оп}}$, относительное изменение предельного момента из-за погрешности в определении остаточной толщины определяется по формуле

$$\frac{\Delta M_{\text{пр}}}{M_{\text{пр}}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{t} \right) \frac{\varphi_n^*}{\varphi^*}. \quad (14)$$

Анализ показал, что редуцирование пластин несущественно повысит влияние погрешности определения остаточной толщины на точность расчета предельного момента. Если не учитывать потерю устойчивости пластин, то погрешность в определении остаточной толщины будет сказываться на точности расчета предельного момента при остаточной толщине менее 4 мм, если погрешность в определении остаточной толщины составляет 0,2 мм; при остаточной толщине менее 6 мм, если погрешность определения остаточной толщины составляет 0,3 мм; при остаточной толщине 8 мм, если погрешность составляет 0,4 мм.

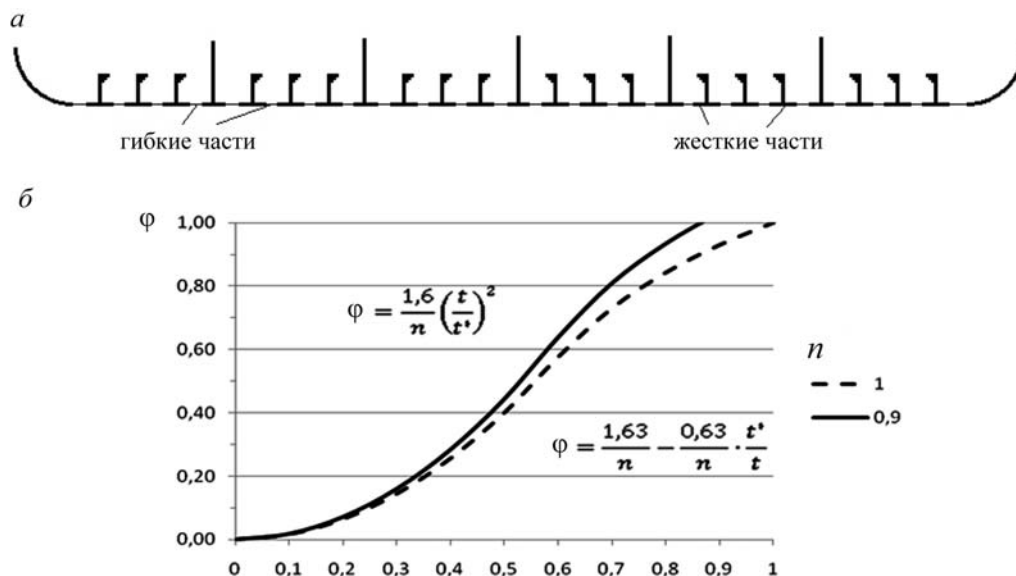


Рис. 1. Изменение предельного момента из-за погрешности в определении остаточной толщины крайней связи при продольной системе набора:
а — схема крайней связи; б — редукционные коэффициенты гибкой части пластин

Влияние потери устойчивости пластин прекращается, начиная с толщин 11,0–13,0 мм, при которых реальные пластины с размерами короткой стороны $a = 500$ мм и $a = 600$ мм соответственно перестают терять устойчивость даже при сжимающих напряжениях, равных пределу текучести материала. При толщинах менее упомянутых потеря устойчивости пластин, оцениваемая изменением их редукционных коэффициентов, начинает влиять на точность расчета предельного момента при толщинах менее 6,3 мм, если погрешность определения остаточной толщины составляет 0,2 мм; при толщинах менее 8,5 мм (в зависимости от размера короткой стороны), если погрешность в определении остаточной толщины составляет 0,3 мм; при толщинах менее 10,2–11,0 мм (в зависимости от размера короткой стороны), если погрешность в определении остаточной толщины составляет 0,4 мм.

При поперечной системе набора площадь крайней связи, например обшивки днища, можно определить, изменив формулу (6), представив ее в виде

$$F_{\text{д}} = t \cdot \varphi^* \cdot b_{\Sigma}, \quad (15)$$

где b_{Σ} — суммарное распространение всех пластин по поперечному сечению, можно брать ширину корпуса судна;

φ^* — обобщенный редукционный коэффициент;

t — средняя остаточная толщина в поперечном сечении.

Суммарное распространение всех пластин по поперечному сечению крайней связи (например, днища, рис. 2) можно представить в виде суммы гибких и жестких частей пластин в виде

$$b_{\Sigma} = b_{\Sigma}^* + b_{\Sigma}^r. \quad (16)$$

Тогда обобщенный редукционный коэффициент, применяемый к площади всей крайней связи tb_{Σ} , определяем по формуле

$$\varphi^* = \alpha_{\text{ж}} + \varphi \cdot \alpha_{\text{г}}, \quad (17)$$

где $\alpha_{\text{ж}} = \frac{b_{\Sigma}^*}{b_{\Sigma}}$ — доля жестких частей в поперечном сечении;

b_{Σ}^* — суммарное распространение жестких частей по поперечному сечению;

$\alpha_\Gamma = \frac{b_\Sigma^\Gamma}{b_\Sigma}$ — доля гибких частей в поперечном сечении;

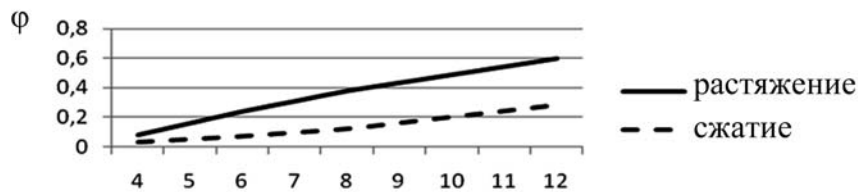
b_Σ^Γ — суммарное распространение гибких частей пластин по поперечному сечению;

$\varphi = \varphi(t)$ — редуцированный коэффициент пластины при поперечной системе набора при сжатии или растяжении по табл. 2.2.79 [3] или по графикам (рис. 2, б).

а



б



в

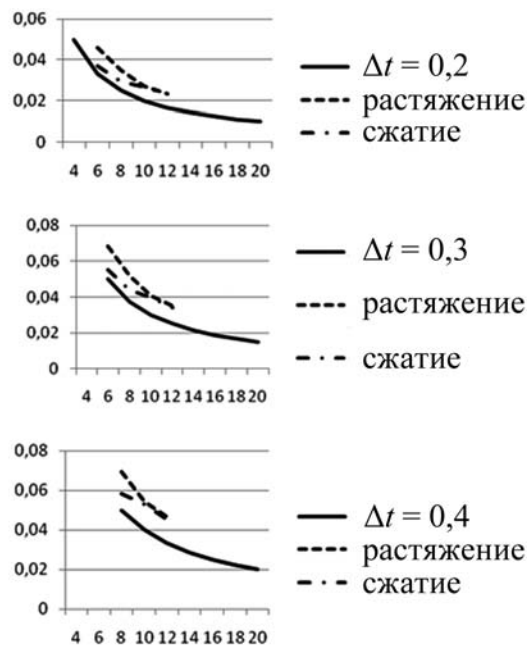


Рис. 2. Изменение предельного момента при поперечной системе набора:

а — схема крайней связи; б — редуцированные коэффициенты гибкой части пластин;

в — графики относительного изменения предельного момента при $\Delta t = 0,2$; $\Delta t = 0,3$ и $\Delta t = 0,4$ соответственно

Для поперечной системы набора получим

$$\frac{F_{\text{д}} - F_{\text{д}}^{\Pi}}{F_{\text{д}}} = \frac{t \cdot \varphi^* \cdot b_{\Sigma} - (t - \Delta t) \varphi_{\Pi}^* \cdot b_{\Sigma}}{t \cdot \varphi^* \cdot b}. \quad (18)$$

После преобразований и сокращений получим формулу, в которой редуцированные коэффициенты должны приниматься для поперечной системы набора:

$$\frac{\Delta F_{\text{д}}}{F_{\text{д}}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{t}\right) \frac{\varphi_n^*}{\varphi^*}, \quad (19)$$

где φ_n^* — обобщенный редуцированный коэффициент с учетом погрешности определения толщины листов.

График относительного изменения предельного момента из-за погрешности определения остаточной толщины при поперечной системе набора крайней связи представлен на рис. 2, в.

Если учитывается редуцирование пластин при поперечной системе набора крайней связи эквивалентного бруса, влияние на относительное изменение предельного момента будет более существенным, чем при продольной системе. Оно будет проявляться не только при сжатии, но и при растяжении пластин крайней связи. При погрешности в определении остаточной толщины $\Delta t = 0,2$ мм относительное увеличение предельного момента, превышающее 5 %, будет при $t \leq 5,5$ мм при сжатии и при $t \leq 7,6$ мм при растяжении вместо 4 мм, если не учитывать редуцирование пластин. При погрешности в определении остаточной толщины $\Delta t = 0,3$ мм относительное увеличение предельного момента, превышающее 5 %, будет при $t \leq 9,7$ мм при сжатии и при $t \leq 10,2$ мм при растяжении вместо 6 мм, если не учитывать редуцирование пластин. При погрешности в определении остаточной толщины $\Delta t = 0,4$ мм относительное увеличение предельного момента, превышающее 5 %, будет при $t \leq 12,6$ мм при растяжении и при $t \leq 15,6$ мм при сжатии вместо 8 мм, если не учитывать редуцирование пластин.

$$\varphi^* = \alpha_{\text{ж}} + \varphi \cdot \alpha_{\text{г}}.$$

Если вместо предельного момента рассматривать относительное изменение коэффициента запаса прочности, то последний можно представить в виде

$$k = \frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{р}}}, \quad (20)$$

и относительное изменение коэффициента запаса:

$$\frac{k - k^*}{k} = \frac{\frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{р}}} - \frac{M_{\text{пр}}^*}{M_{\text{р}}^*}}{\frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{р}}}}, \quad (21)$$

или после сокращений и преобразований:

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta M_{\text{пр}}}{M_{\text{пр}}} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta t}{t}\right) \frac{\varphi_n^*}{\varphi^*}. \quad (22)$$

Как и следовало ожидать, изменение коэффициента запаса прочности корпуса по предельному моменту будет такое же, как и относительное изменение предельного момента.

Заключение

Выполненное исследование позволило установить аналитические зависимости для влияния случайной погрешности измерения остаточных толщин элементов конструкции корпуса судна на относительное изменение расчетных характеристик прочности корпуса судна; получить значения случайных погрешностей измерения остаточных толщин элементов, обеспечивающие допустимые для инженерных расчетов отклонения, не превышающие 5 % характеристик прочности корпуса.

Установлены аналитические зависимости влияния случайной погрешности измерения остаточной толщины элементов корпуса:

- 1) на относительное отклонение предельного момента и коэффициента запаса прочности для корпуса судна с продольной системой набора;
- 2) относительное отклонение предельного момента и коэффициента запаса прочности для корпуса судна с поперечной системой набора крайних связей.

Список литературы

1. Справочник по строительной механике корабля / под ред. Ю. А. Шиманского. — Л.: Судпромгиз, 1958. — Т. 1, 2.
2. Ершов Н. Ф. Предельное состояние и надежность конструкций речных судов / Н. Ф. Ершов, О. И. Свечников. — Л.: Судостроение, 1970.
3. Российский речной Регистр. Правила. — М.: По Волге, 2002. — Т. 1.
4. Российский речной Регистр. Правила. — М.: По Волге, 2002. — Т. 2.
5. Беленький Л. М. Повышение несущей способности днищевых перекрытий / Л. М. Беленький, В. В. Макаров // Судоремонт флота рыбной промышленности.
6. Барышников С. О. Расчет редуционных коэффициентов элементов корпуса судна по Правилам Российского речного регистра / С. О. Барышников // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2010. — Вып. 3 (7).
7. Чистов В. Б. Анализ влияния погрешностей в определении остаточных толщин на прочностные характеристики пластин обшивки и настилов корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк, М. Г. Пеликова // Сб. тр. ВБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». — 2013.
8. Чистов В. Б. Оценка влияния погрешностей в определении остаточных толщин на несущие характеристики балок набора корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк // Сб. науч. тр. — СПб.: СПГУВК, 2013.

УДК 629.122.004.67.002(075.8)

Н. М. Вихров,
д-р техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. А. Голицын,
канд. техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССА АНОДНО-СТРУЙНОГО ХРОМИРОВАНИЯ

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ANOD-JET CHROMIUM-PLATING PROCESS

В статье обсуждается вопрос влияния конструктивных и гидродинамических параметров перфорированного отверстиями анода, через которые в виде затопленных струй подается электролит в межэлектродное пространство в процессе электроосаждения хрома, на локальное распределение хрома на поверхности катода.

The article considers the effect of the structural and hydrodynamic parameters of anode perforated with holes through which electrolyte is fed in the form of submerged jets to the interelectrode space during electrodeposition of chromium on the local distribution of the chromium on the surface of the cathode.

Ключевые слова: электролитическое хромирование, истечение затопленной струи, гидродинамические параметры струи, конструктивные параметры анода, локальное распределение хрома на катоде.

Key words: electrolytic chrome plating, the expiry of a submerged jet, hydrodynamic parameters of the jet, the design parameters of the anode, the local distribution of chromium on the cathode.