

УДК 544.722.3:539.612

СМАЧИВАНИЕ И РАБОТА АДГЕЗИИ РАСПЛАВА СТЕКЛА $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ К РАЗЛИЧНЫМ КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

© 2024 г. С. В. Мишинов, Б. С. Степанов *, В. С. Ширяев,
Е. Н. Лашманов, А. С. Степанов, Р. Д. Благин

*Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Деярых Российской академии наук,
Россия, 603137 Нижний Новгород, ул. Тropicина, 49*

**e-mail: stepanov@ihps-nnov.ru*

Поступила в редакцию 02.02.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

Исследованы смачивание и работа адгезии расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ к нержавеющей стали марок AISI 201 и AISI 430 с обычной и азотированной поверхностями, титану и сплаву на основе карбида вольфрама ВК8 в интервале температур 480–530 °С. Установлено, что азотирование поверхности нержавеющей стали приводит к уменьшению работы адгезии халькогенидных расплавов к поверхности нержавеющей стали в 2–3 раза. Среди всех рассмотренных конструкционных материалов максимальная работа адгезии расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ наблюдается к нержавеющей стали марки AISI 201, минимальная – к азотированной стали AISI 430.

Ключевые слова: смачивание, поверхностное натяжение, работа адгезии, халькогенидное стекло

DOI: 10.31857/S0002337X24050118, **EDN:** MWIQOQ

ВВЕДЕНИЕ

Халькогенидные стекла обладают широким окном прозрачности в ИК-диапазоне длин волн (1–25 мкм), выраженными нелинейными свойствами (показатель преломления n_2 на 2–3 порядка выше, чем у кварцевого стекла) и низкими значениями энергии фононов (300–400 см⁻¹), что делает их перспективными материалами для использования в инфракрасной оптике [1]. Стекла Ge–Sb–Se широко используются как в волоконной оптике, так и при изготовлении линз, призм, оптических окон [2].

Большое количество исследований посвящено изготовлению линз из стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ методом горячего прессования и исследованию их свойств [3–5]. Стекло состава $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ имеет широкий диапазон пропускания (2–16 мкм) и менее токсично по сравнению с мышьяксодержащими аналогами, поэтому может быть использовано,

в том числе, в медицинской технике [6, 7]. Стекло данного состава было выбрано в качестве объекта исследования, поскольку оно является одним из наиболее широко используемых материалов для ближнего и среднего ИК-диапазонов.

Новым и быстро развивающимся направлением в изготовлении оптических устройств является использование аддитивных технологий. В работах [8, 9] использовались методы 3D-печати для получения заготовок микроструктурированных оптических волокон. Использование аддитивных технологий при создании устройств ИК-фотоники требует дополнительных сведений о взаимодействии конструкционных материалов с халькогенидными стеклами при температурах формования и экструзии [10].

Одной из технологических проблем, затрудняющих работу с халькогенидными стеклами и заготовками, является высо-

кая химическая активность халькогенидных расплавов. При высокой температуре они способны взаимодействовать со многими веществами, что затрудняет подбор конструкционных материалов для изготовления аппаратуры для работы с халькогенидными расплавами и стеклами. При получении халькогенидных образцов в форме стержней и трубок широко применяется аппаратура из кварцевого стекла [11]. Этот материал устойчив к воздействию халькогенидных расплавов в широком диапазоне температур, однако из-за своей хрупкости и сложности обработки область его использования ограничена. В случае, если технологический процесс получения изделий из халькогенидных стекол предполагает значительные механические нагрузки, например, при экструдировании или прецизионном формовании, использование кварцевого стекла невозможно. В связи с этим важной научно-технологической задачей является поиск материалов, наиболее устойчивых к воздействию халькогенидных расплавов. В качестве параметров, позволяющих оценить интенсивность взаимодействия халькогенидного расплава с конструкционным материалом, могут рассматриваться краевой угол смачивания и работа адгезии.

В качестве перспективных конструкционных материалов, потенциально пригодных для изготовления аппаратуры, контактирующей с халькогенидными расплавами и стеклами при относительно низких температурах, могут быть рассмотрены металлы и сплавы с высокой устойчивостью к действию агрессивных сред. В данной работе рассматривается поверхностное взаимодействие халькогенидного стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ с нержавеющей сталью марок AISI 201 и AISI 430 с обычной и азотированной поверхностью, сплавом карбида вольфрама ВК8 (92% WC, 8% Co) и титаном.

Стали марок AISI 201 и AISI 430 были выбраны по результатам ранее проведенных исследований [12] как материалы, к которым халькогенидное стекло проявляет высокую и низкую адгезию соответственно с целью выяснить, как влияет дополнительная обработка (азотирование) поверхности на ве-

личину адгезии. Известно, что азотирование стали повышает поверхностную прочность металла и увеличивает его коррозионную стойкость [13–15], однако влияние данного метода обработки на адгезионные характеристики стали ранее не рассматривалось.

Сплав на основе карбида вольфрама ВК8 и титан были выбраны в качестве объектов исследования как материалы, которые потенциально могут быть использованы при изготовлении аппаратуры для работы с халькогенидными стеклами. Титан широко применяется для изготовления химических реакторов, поскольку обладает высокой устойчивостью к действию различных агрессивных сред и механической прочностью. Высокая твердость карбида вольфрама обуславливает его использование в аппаратуре для изготовления халькогенидных оптических элементов методом прецизионного прессования [16, 17]. Адгезия халькогенидных стекол к данным конструкционным материалам ранее не исследовалась.

Исследованы смачивание поверхности конструкционных материалов расплавом и работа адгезии расплава. Данные параметры важно учитывать при выборе конструкционного материала аппаратуры, поскольку хорошее смачивание поверхности стали халькогенидным расплавом свидетельствует об активном взаимодействии контактирующих материалов. Это может привести к загрязнению получаемых образцов примесями, поступающими из материала аппаратуры, а в случае отверждения расплава, контактирующего с конструкционным материалом (например, в процессе изготовления оптических элементов методом прецизионного прессования), — к разрушению образцов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение стекол. Стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ синтезировались из простых веществ (германия, сурьмы и селена) со степенью чистоты 6N. Германий предварительно прокаливался в вакууме при температуре 700 °C для удаления примеси монооксида германия с поверхности гранул. Ампулы из кварцевого стекла, используемые для плавки шихты,

предварительно промывались смесью фтористоводородной и азотной кислот и деионизированной водой, после чего высушивались в токе чистого азота при 600 °С.

Халькогенидное стекло получали плавлением простых веществ в вакуумированных кварцевых ампулах (10^{-3} Па). Селен загружался в реактор с германием и сурьмой испарением в вакууме при температуре 420–450 °С. Стеклообразующий расплав гомогенизировали при 800 °С в течение 6 ч в трубчатой качающейся печи. После этого расплав охлаждался в режиме выключенной печи до 580 °С и закаливался на воздухе. Полученные стекла отжигали при температуре стеклования в течение 30 мин для снятия механических напряжений.

Волокна диаметром 600 мкм из стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$, использованные при измерении поверхностного натяжения, были получены методом экструдирования халькогенидного расплава при температуре 340–380 °С.

Азотирование поверхности стальных образцов. Образцы стали с азотированной

поверхностью получали методом высокотемпературного газового азотирования [15]. Стальные подложки выдерживались в атмосфере смеси аммиака и водорода при температуре 650 °С в течение 6 ч, в результате чего на поверхности стали формировался азотированный слой толщиной около 300 мкм.

Морфология поверхности подложек. Морфология поверхности исследуемых образцов контролировалась с помощью цифрового USB-микроскопа Micmed 2.0 и измерителя шероховатости TIME 3220. В работе были использованы подложки со средним значением шероховатости R_a 0.3–0.7 мкм. Микрофотографии и профилограммы поверхности образцов приведены на рис. 1.

Выбор диапазона шероховатости обусловлен особенностями морфологии поверхности азотированных стальных образцов. В процессе азотирования шероховатость поверхности стали увеличивалась до 0.7 мкм. Известно, что измеряемое значение краевого угла смачивания зависит от шероховатости поверхности субстрата (если субстрат смачивается адгезивом, увеличение

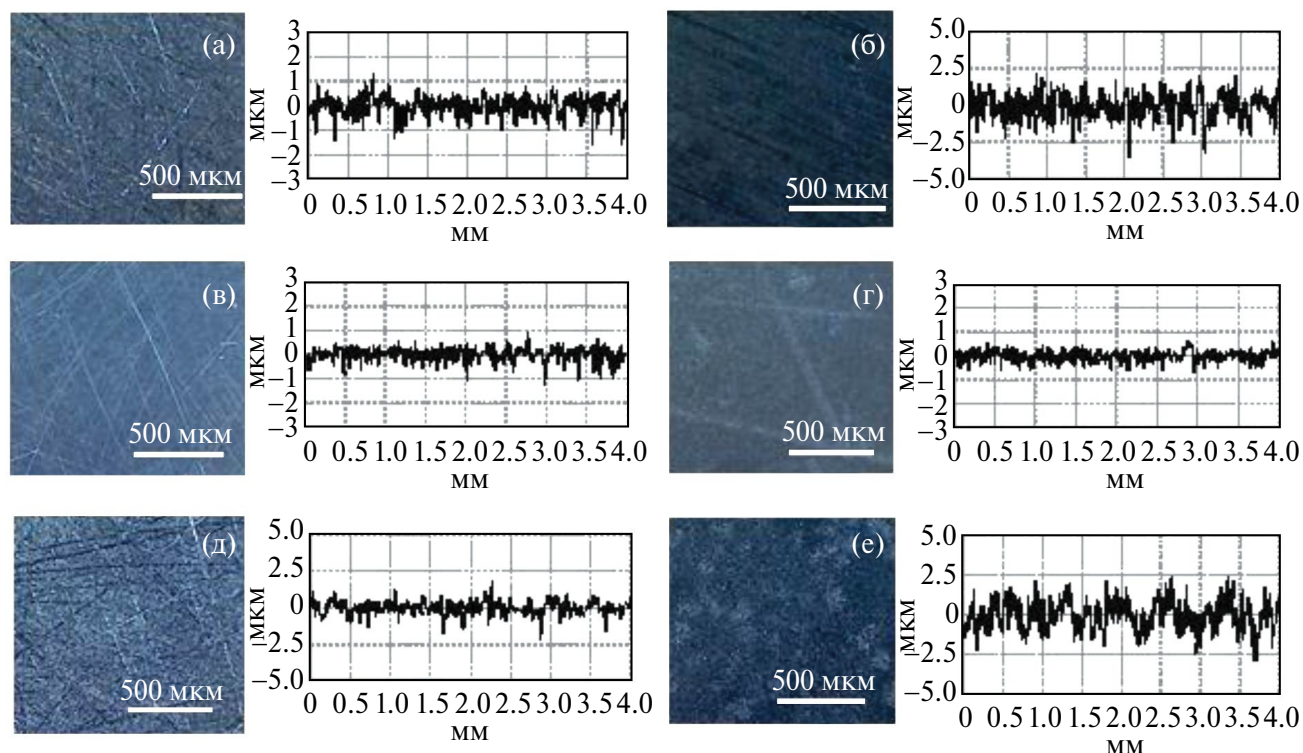


Рис. 1. Морфология поверхности исследуемых материалов. а – AISI 430 исходная, б – AISI 430 азотированная, в – AISI 201 исходная, г – AISI 201 азотированная, д – титан, е – сплав ВК8.

шероховатости приводит к уменьшению краевого угла смачивания, если не смачивается — к увеличению). По этой причине поверхность неазотированной стали, титана и сплава ВК8 подвергалась механической обработке с целью получения значений шероховатости, близких к шероховатости азотированной стали, для адекватного сравнения адгезионных свойств материалов.

Измерение краевых углов смачивания материалов расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$. Измерение краевых углов смачивания различных материалов халькогенидным расплавом осуществлялось методом сидячей капли в атмосферных условиях. Образец стекла массой 0.05–0.07 г помещался на подложку и плавился при заданной температуре. Система выдерживалась при данной температуре до достижения краевым углом стационарного значения, после чего образующаяся капля фотографировалась с помощью цифрового USB-микроскопа Micmed 2.0, и по полученному изображению с помощью компьютерной программы PicPick определялся краевой угол смачивания θ . Пример изображения капли расплавленного стекла приведен на рис. 2.

Измерение поверхностного натяжения стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$. Для расчета работы адгезии расплава к поверхности субстрата необходимо знать значение поверхностного натяжения адгезива. Поверхностное натяжение халькогенидного стекла измерялось методом плавления стекловолокна [18, 19]. Об-

разец стекла в виде нити толщиной 600 мкм помещался в трубчатую печь сопротивления и нагревался с постоянной скоростью 1 °С/мин. Под действием силы поверхностного натяжения волокно начинало утолщаться и укорачиваться, формируя небольшую каплю. При дальнейшем нагревании волокно начинало удлиняться и утончаться. Момент, когда волокно достигало первоначальной длины, означал, что сила тяжести уравновешивает поверхностное натяжение, которое в этом случае может быть рассчитано по формуле

$$\gamma = \frac{2mg}{\pi d}, \quad (1)$$

где m — масса участка стекловолокна ниже точки начала нагрева, рассчитывалась из измеренных параметров стекловолокна, g — ускорение свободного падения, d — диаметр волокна. Схема процесса приведена на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные зависимости краевых углов смачивания исследуемых материалов расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ представлены на рис. 4. Видно, что во всех случаях наблюдается линейное уменьшение краевых углов смачивания с ростом температуры. Коэффициенты a и b линейной аппроксимации температурных зависимостей углов смачивания в интервале температур 480–530 °С

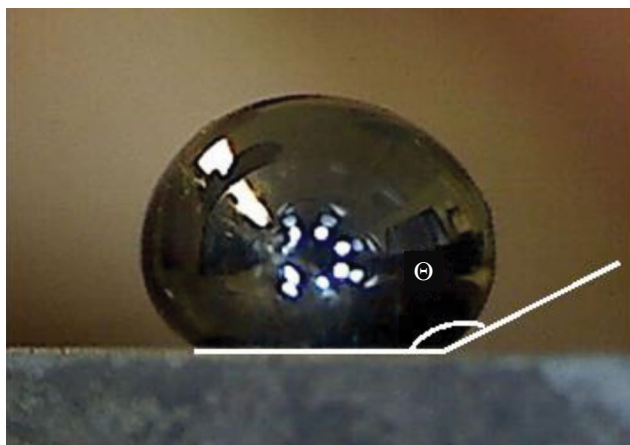


Рис. 2. Капля расплавленного стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ на подложке из стали AISI 430.

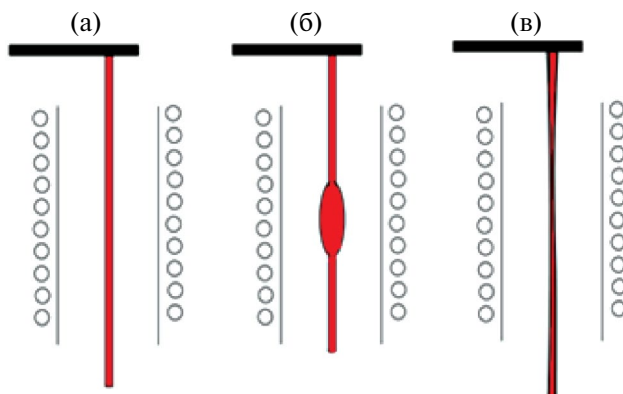


Рис. 3. Схема процесса измерения поверхностного натяжения. а — начальный момент, б — преобладание силы поверхностного натяжения, в — преобладание силы тяжести.

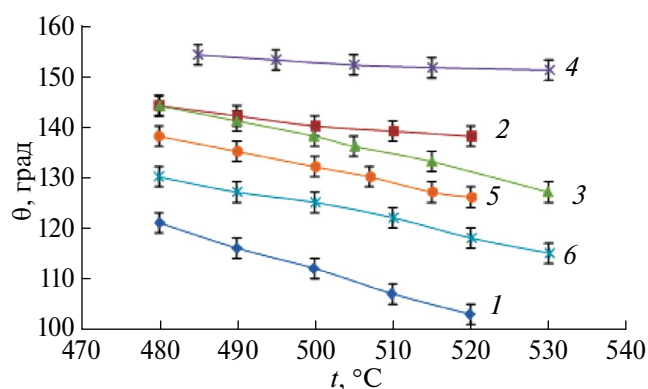


Рис. 4. Температурные зависимости краевых углов смачивания исследуемых материалов расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$. 1 — сталь AISI 201, 2 — сталь AISI 201 с азотированной поверхностью, 3 — сталь AISI 430, 4 — сталь AISI 430 с азотированной поверхностью, 5 — титан, 6 — сплав ВК8.

$$\theta = a - bT \quad (2)$$

приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты линейной аппроксимации углов смачивания материалов расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$

№	Материал	a , град	b , град/°C
1	AISI 201	336.8	0.45
2	AISI 201 (азот.)	215.6	0.15
3	AISI 430	306.6	0.34
4	AISI 430 (азот.)	186.1	0.07
5	Ti	284.5	0.31
6	IG8	274.3	0.30

Хуже всего расплавом халькогенидного стекла смачивается азотированная поверхность нержавеющей стали (зависимости 2, 4). Значения краевых углов смачивания азотированных сталей AISI 201 и AISI 430 составляют 140° – 155° и слабо зависят от температуры (коэффициенты b аппроксимирующей зависимости равны 0.15 и 0.07 соответственно). Лучше всего смачивается расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ сталь AISI 201 с неазотированной поверхностью (зависимость 1), значения краевого угла смачивания находятся в диапазоне 100° – 120° . Кроме того, для данного материала характерна выраженная зависимость угла смачивания от температуры (коэффициент b аппроксимирующей зависимости равен 0.45).

На рис. 5 представлена температурная зависимость поверхностного натяжения расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$. Можно видеть, что поверхностное натяжение линейно уменьшается с ростом температуры. Значение поверхностного натяжения и вид температурной зависимости характерны для расплавов халькогенидных стекол [19, 20].

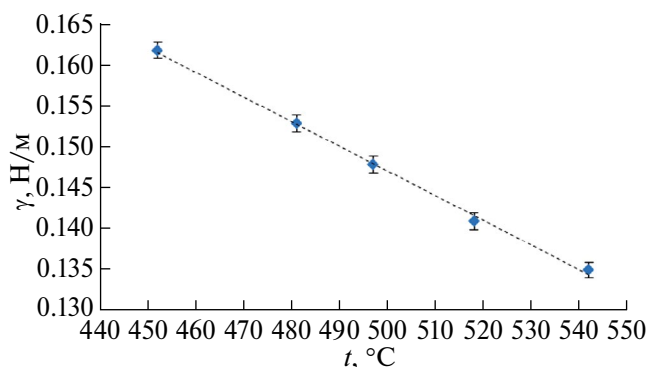


Рис. 5. Температурная зависимость поверхностного натяжения расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$.

Работа адгезии халькогенидного расплава к исследуемым субстратам рассчитывалась по уравнению Дюпре-Юнга

$$W_a = \gamma(1 + \cos\theta), \quad (3)$$

где γ — поверхностное натяжение расплава, θ — краевой угол смачивания.

Рассчитанные температурные зависимости работы адгезии халькогенидного стекла к исследуемым субстратам представлены на рис. 6. Можно видеть, что работа адгезии расплава халькогенидного стекла к поверхности всех исследованных материалов возрастает с ростом температуры. При этом в случаях азотированной нержавеющей стали (зависимости 2, 4) зависимость работы адгезии от температуры выражена достаточно слабо.

Ранее проведенные исследования свидетельствуют о том, что величина адгезии халькогенидных стекол к конструкционному материалу аппаратуры коррелирует с загрязняющим действием материала. При этом в зависимости от природы конструкционного материала примеси могут переходить

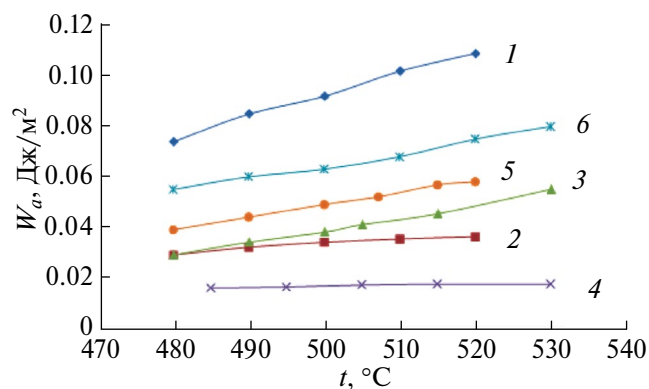


Рис. 6. Температурные зависимости работы адгезии расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ к исследуемым материалам. 1 — сталь AISI 201, 2 — сталь AISI 201 с азотированной поверхностью, 3 — сталь AISI 430, 4 — сталь AISI 430 с азотированной поверхностью, 5 — титан, 6 — сплав ВК8.

в объем стекла как в растворенной форме [12], так и в виде гетерогенных частиц [21]. В случае рассматриваемых материалов можно ожидать, что наибольшее загрязняющее действие при контакте с халькогенидным расплавом будет оказывать сталь AISI 201, наименьшее — сталь AISI 430 с азотированной поверхностью.

Сравнение адгезионных характеристик исследованных материалов позволяет сделать вывод, что все они, за исключением стали AISI 201 с необработанной поверхностью, теоретически могут быть использованы для изготовления аппаратуры, контактирующей с расплавами халькогенидных стекол. Однако важно учитывать, что изготовление деталей из сплава карбида вольфрама представляет собой сложную технологическую задачу в силу высокой твердости данного материала, а титан имеет достаточно высокую стоимость. Таким образом, оптимальным вариантом для изготовления аппаратуры с точки зрения адгезионных характеристик, простоты обработки и коммерческой доступности является нержавеющая сталь с азотированной поверхностью. Модификация поверхности стали методом азотирования позволяет существенно уменьшить поверхностное взаимодействие халькогенидного расплава с субстратом даже в том случае, когда исходная сталь характеризуется сильным адгезионным взаимодействием с халькогенидным расплавом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом сидячей капли исследована смачиваемость нержавеющей стали марок AISI 201 и AISI 430 с обычной и азотированной поверхностями, титана и сплава на основе карбида вольфрама ВК8 расплавом стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ в интервале температур 480–530 °C. Во всех рассмотренных случаях краевые углы смачивания линейно уменьшаются с ростом температуры.

С использованием экспериментально определенных значений поверхностного натяжения расплава стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ и краевых углов смачивания рассчитана работа адгезии халькогенидного расплава к исследуемым материалам. Максимальная работа адгезии наблюдается в случае нержавеющей стали AISI 201 с необработанной поверхностью, минимальная — в случае стали AISI 430 с азотированной поверхностью. Установлено, что азотирование поверхности нержавеющей стали приводит к уменьшению работы адгезии в 2–3 раза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке национального проекта “Наука и университеты” в рамках созданной лаборатории “Высокочистые халькогенидные стекла для фотоники среднего ИК-диапазона”, государственное задание № 075–03–2021–412 (FFSR-2021–0001).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zakery A., Elliott S.R. Optical Properties and Applications of Chalcogenide Glasses: A Review // J. Non-Cryst. Solids. 2003. V. 330. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064>
2. Snopatin G.E., Shiryayev V.S., Churbanov M.F., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. High-Purity Chalcogenide Glasses for Fiber Optics // Inorg. Mater. 2009. V. 45. P. 1439–1460. <https://doi.org/10.1134/S0020168509130019>

3. *Bae D.-S., Yeo J.-Bin, Lee H.-Yong.* A Study on a Production and Processing Technique for a GeSbSe Aspheric Lens with a Mid-infrared Wavelength Band // *J. Korean Chem. Soc.* 2013. V. 62. P. 1610–1615. <https://doi.org/10.3938/jkps.62.1610>
4. *Grayson M., Krueper G., Xu B., Hjelme D., Gopinath J.T., Park W.* GeSbSe Devices for Mid-Infrared Optical Sensing // *Optical Sensors and Sensing Congress 2022 (AIS, LACSEA, Sensors, ES), Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022)*, P. SM4E.2. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2022.SM4E.2>
5. *Kadono K., Kitamura N.* Recent Progress in Chalcogenide Glasses Applicable to Infrared Optical Elements Manufactured by Molding Technology // *J. Ceram. Soc. Jpn.* 2022. V. 130. P. 584–589. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.22079>
6. *Parnell H., Furniss D., Tang Z., Fang Y., Benson T.M., Canedy C.L., Kim C.S., Kim M., Merritt C.D., Bewley W.W., Vurgaftman I., Meyer J.R., Seddon A.B.* High Purity Ge-Sb-Se/S Step Index Optical Fibers // *Opt. Mater. Express.* 2019. V. 9. P. 3616–3626. <https://doi.org/10.1364/OME.9.003616>
7. *Kaswan A., Kumari V., Patidar D., Saxena N.S., Sharma K.* Kinetics of Phase Transformations and Thermal Stability of $\text{Ge}_x\text{Se}_{70}\text{Sb}_{30-x}$ ($x = 5, 10, 15, 20$) Chalcogenide Glasses // *New J. Glass Ceram.* 2013. V. 3. P. 99–103. <https://doi.org/10.4236/njgc.2013.34016>
8. *Carcreff J., Chevire F., Lebullenger R., Gautier A., Chahal R., Adam J.L., Calvez L.T., Brilland L., Galdo E., Coq D.L., Renversez G., Troles J.* Investigation on Chalcogenide Glass Additive Manufacturing for Shaping Mid-Infrared, Optical Components and Microstructured Optical Fibers // *Crystals.* 2021. V. 11. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/cryst11030228>
9. *Simon A.A., Badamchi B., Subbaraman H., Sakaguchi Y., Jones L., Kunold H., Rooyen I.J., Mitkova M.* Introduction of Chalcogenide Glasses to Additive Manufacturing: Nanoparticle Ink Formulation, Inkjet Printing, and Phase Change Devices Fabrication // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 14311. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93515-y>
10. *Baudet E., Ledemi Y., Larochelle P., Morency S., Messaddeq Y.* 3D-Printing of Arsenic Sulfide Chalcogenide Glasses // *Opt. Mater. Express.* 2019. V. 9. P. 2307–2317. <https://doi.org/10.1364/OME.9.002307>
11. *Shiryaev V.S., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Snopatin G.E., Churbanov M.F., Biriukov A.S., Kotereva T.V., Mishinov S.V., Alagashev G.K., Kolyadin A.N.* Development of Technique for Preparation of As_2S_3 Glass Preforms for Hollow Core Microstructured Optical Fibers // *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 2014. V. 16. P. 1020–1025.
12. *Mishinov S.V., Stepanov B.S., Velmuzhov A.P., Shiryaev V.S., Lashmanov E.N., Potapov A.M., Evdokimov I.I.* Wettability of Stainless Steel with a $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ Glass Melt and Its Contact Adhesion Strength // *J. Non-Cryst. Solids.* 2022. V. 578. P. 121351. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2021.121351>
13. *Faltesek P., Joska Z., Pokorný Z., Dobrocký D., Studený Z.* Effect of Nitriding on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steels // *Manuf. Technol.* 2019. V. 19. P. 745–748. <https://doi.org/10.21062/ujep/365.2019/a/1213-2489/MT/19/5/745>
14. *Slima S.B.* Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance // *Mater. Sci. Appl.* 2012. V. 3. P. 640–644. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2012.39093>
15. *Shaikhutdinova L.R., Khairtdinov E.F., Khusainov Yu.G.* Effect of Ion Nitriding on the Structural and Phase Composition and Mechanical Properties of High-Speed Steel R6M5 after SPD // *Met. Sci. Heat Treat.* 2020. V. 62. P. 263–268. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00546-9>
16. *Abdel-Moneim N.S., Mellor C.J., Benson T.M., Furniss D., Seddon A.B.* Fabrication of Stable, Low Optical Loss Rib-Waveguides Via Embossing of Sputtered Chalcogenide Glass-Film on Glass-Chip // *Opt. Quantum Electron.* 2015. V. 47. P. 351–361. <https://doi.org/10.1007/s11082-014-9917-z>
17. *Cha D.H., Kim H., Hwang Y., Jeong J. Ch, Kim J.* Fabrication of Molded Chalcogenide-Glass Lens for Thermal Imaging Applications // *Appl. Opt.* 2012. V. 51. P. 5649–5656. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-51-23-5649>
18. *Boyd K., Ebendorff-Heidepriem H., Monro T.M., Munch J.* Surface Tension

- and Viscosity Measurement of Optical Glasses Using a Scanning CO₂ Laser // Opt. Mater. Express. 2012. V. 2. P. 1101–1110. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001101>
19. Мишинов С.В., Чурбанов М.Ф., Ширяев В.С. Смачивание, поверхностное натяжение и работа адгезии расплавов стекол As₂S₃ и As₂Se₃ к кварцевому стеклу // Физ. хим. стекла. 2016. Т. 42. № 6. С. 713–720. <https://doi.org/10.1134/S108765961606016X>
20. Мельниченко Т.Д., Феделеш В.И., Мельниченко Т.Н., Сандитов Д.С., Бадмаев С.С., Дамдинов Д.Г. О приближенной оценке поверхностного натяжения расплавов халькогенидных стекол // Физ. хим. стекла. 2009. Т. 35. № 1. С. 40–54. <https://doi.org/10.1134/S1087659609010052>
21. Churbanov M.F., Mishinov S.V., Shiryayev V.S., Ketkova L.A. Contamination of Glassy Arsenic Sulfide by SiO₂ Particles During Melt Solidification in Silica Glassware // J. Non-Cryst. Solids. 2018. V. 480. P. 3–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.006>