

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 2 (176). С. 41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 41-48.

Научная статья
УДК 621.771.07;621.787.6
doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-41-48

Определение прочности сцепления на поверхностях, смоделированных различными микровыступами

Елена Юрьевна Звягина, к.т.н.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия
zviagina_mmf@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4948-5366>

***Аннотация.** Прочность сцепления лакокрасочного покрытия на поверхности холоднокатаной полосы является важным показателем для дальнейшей эксплуатации в автомобилестроении. Адгезия характеризуется прочностью сцепления между покрытием и подложкой, которая определяется силой, требующейся для отделения покрытия от подложки. Принято считать, что шероховатость поверхности создает благоприятные условия для хорошей адгезии. Представлены результаты проведенного моделирования микровыступов поверхности с целью определения усилия отрыва. Моделирование производилось на подготовленных образцах диаметром 25 мм из дюралюминия Д16. С использованием фрезерного станка и специально подготовленных режущих инструментов были сформированы микропрофиля различной формы: в виде пирамиды, сферической формы, в виде усеченного конуса и прямоугольной формы. Согласно ГОСТ 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007) на поверхности, смоделированные различными микропрофилями нанесено клеевое покрытие одинаковой толщины. Для обеспечения одинаковых условий подготовки к проведению испытаний для склеивания поверхностей выдерживалось одинаковое прижимное усилие. После отверждения клея, приклеенные заготовки подвергают испытанию на растяжение (испытание на отрыв). Для выполнения практической части проводимых исследований было использовано разрывное устройство для испытания на отрыв ГОСТ 32299-2013. По результатам испытаний можно судить о влиянии формы микропрофиля на адгезию между поверхностью и покрытием, а также о влиянии на прочность сцепления формы микровыступа и контактной площади. Используя классификацию адгезионного разрушения, определили тип разрушения исследуемых образцов. Из-за отсутствия в литературе данных об установлении взаимосвязи между формой контактной поверхности и адгезией, авторами экспериментально было установлено влияние формы микровыступов на прочность сцепления с покрытием, путем определения отрывного усилия.*

Ключевые слова: адгезия, микропрофиль, прочность сцепления, отрывное усилие

Для цитирования: Звягина Е.Ю. Определение прочности сцепления на поверхностях, смоделированных различными микровыступами // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 2 (176). С. 41-48. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-41-48

Adhesion strength test for the surfaces modulated by various microasperities

Elena Yu. Zvyagina, PhD. Eng.
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
zviagina_mmf@mail.ru

Abstract. The adhesion strength of the paintwork on the surface of the cold-rolled strip is an important indicator for further use in the automotive industry. Adhesion is characterized by cohesive resistance between the coating and the substrate, which is determined by the force required to separate the coating from the base surface. It is generally accepted that surface roughness creates favorable conditions for good adhesion. Simulation results of microasperities within the surface in order to determine the tearing force are presented. The simulation was performed on prepared samples with a diameter of 25 mm made of duralumin D16. Using a milling machine and specially prepared cutting tools, microprofiles were composed diversiform: a pyramid, a spherical shape, a truncated cone and a rectangular one. According to the State Standard 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007), a glue-coating of the same thickness is applied to surfaces modulated with various microfilaments. To ensure the same conditions of preparation for the tests, the same clamping force was applied for bonding surfaces. After the glue has cured, the glued work materials are subjected to a tensile test (tear-off test). To carry out the practical part of the research, a pull test machine was used for the tear test (State Standard 32299-2013). According to the test results, it is possible to make conclusions about a microprofile shape effect on the adhesion between the surface and the coating, as well as the effect on the adhesion strength of microasperity shape and the contact area. Using the classification of adhesive fracture, the type of fracture of the studied samples was determined. Due to the lack of data in the references concerning the relationship between the shape of the contact surface and adhesion, the authors experimentally found out that the effect of the microasperities shape on the adhesion strength to the coating by determining the tear-off force.

Keywords: adhesion, microprofile, adhesion strength, tear-off force

For citation: Zvyagina E.Yu. Adhesion strength test for the surfaces modulated by various microasperities / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-41-48

Введение

От качества поверхностного слоя зависят не только эксплуатационные свойства (сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости) но и адгезия покрытия. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температур и давлений роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная поверхность должна быть достаточно твёрдой, должна иметь мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью

опорной поверхности [1 – 3], и определенного диапазона значений высотных и шаговых параметров шероховатости [4, 5].

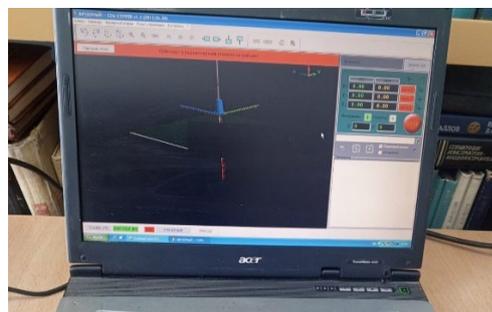
Для лакокрасочных покрытий адгезия определяет качество сцепления с поверхностью, глубину проникновения в поры и срок службы покрытия. Чем выше адгезионные свойства, тем прочнее и долговечнее будет окраска [6 – 8]. Если сцепление слабое, покрытие может откалываться или расходиться тонкими слоями, что приводит к коррозии и ухудшению характеристик основания [9].

Методика проведения экспериментов

Подготовленный образец диаметром 25 мм из дюралюминия Д16 закреплялся в тисках фрезерного станка с ЧПУ (рис. 1, а, б).



а)



б)

Рис. 1. Фрезерный станок с ЧПУ:

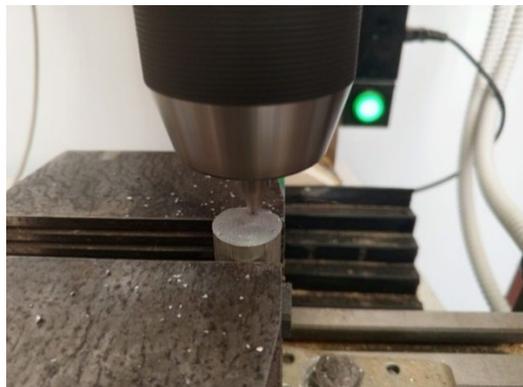
а – общий вид; б – управляющая программа

Fig. 1. CNC milling machine:

а – general view; б – control program

По заранее составленной программе (рис. 1, б) к поверхности образца подводился режущий инструмент (рис. 2, а) формирующий

микропрофиль различной формы. Схема обработки представлена на рис. 2, б.



а)



б)

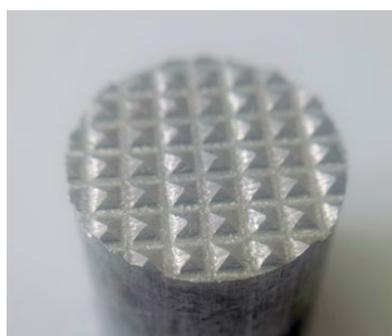
Рис. 2. Процесс формирования микропрофиля:

а – подвод режущего инструмента к обрабатываемой поверхности образца; б – схема обработки

Fig. 2. The process of microprofile formation:

а – the supply of the cutting tool to the treated surface of the sample; б – cut-map

Смоделированные микропрофиля поверхности представлены на рис. 3.



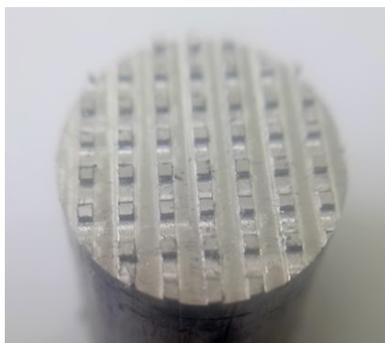
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Моделирование различного профиля на образцах:

а – в виде пирамиды; б – сферической формы; в – в виде усеченного конуса; г – прямоугольной формы

Fig. 3. Modeling of various profiles on samples:

а – in the form of a pyramid; б – spherical shape; в – in the form of a truncated cone; г – rectangular shape

Согласно ГОСТ 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007) «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва продукт, подвергаемый испытанию, наносят на пластины одинаковой толщины и текстуры поверхности. После сушки лакокрасочной системы, цилиндрические заготовки приклеивают непосредственно к окрашенной поверхности пластины с помощью клеящего

вещества. После отверждения клея, приклеенные заготовки подвергают испытанию на растяжение (испытание на отрыв) под контролем, измеряют усилие, потребовавшееся для отрыва покрытия от поверхности [10]. Схема устройства для испытания на отрыв представлена на рис. 4.

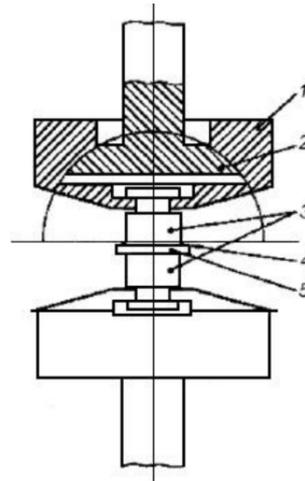


Рис. 4. Схематическое изображение разрывного устройства для испытаний ГОСТ 32299-2013:
1 – опора; 2 – шаровое соединение; 3 – заготовки; 4 – лакокрасочное покрытие; 5 – окрашиваемая поверхность

Fig. 4. Schematic representation of a bursting device for testing State Standard 32299-2013:
1 – support; 2 – spherical joint; 3 – blanks; 4 – paint coating; 5 – painted surface

Обработка результатов

Прочность при отрыве рассчитываем по формуле:

$$\sigma = P/F, \quad (1)$$

где P – разрывное усилие, Н; F – площадь поперечного сечения, мм².

Результат испытания представляет собой растягивающее усилие, необходимое для разрушения самой слабой границы раздела (нарушение адгезии) или самого слабого компонента (нарушение когезии) в испытуемом образце. Также может произойти смешанное разрушение клея и приклеенного компонента. Значения контактной площади F в зависимости от значений $R_z P_c$ представлены в табл. 1.

1. Значение контактной площади F при значении $R_z P_c = 1,0$

1. The value of the contact area F at the value $R_z P_c = 1,0$

№ образца	Моделирование микровыступов	Расчетная формула контактной площади	Значение контактной площади F
1	в виде пирамиды	$F_1 = 2\sqrt{1 + 0,04(R_z \cdot P_c)^2}$	1020,0
2	сферической формы	$F_1 = 1 + 0,01\pi(R_z \cdot P_c)^2$	1031,4
3	в виде усеченного конуса	$F_1 = 1 + \frac{\pi}{4}(\sqrt{1 + 0,04(R_z \cdot P_c)^2} - 1)$	1004,8
4	прямоугольной формы	$F_1 = 1 + 0,2R_z P_c$	1200

На разрывной машине, общий вид которой представлен на рис. 7., испытывали на отрыв образцы 1 – 4. Для фиксации образцов в

разрывных губках, предусматривали вкручивание в торец образца металлических саморезов 6×80 мм.



Рис. 7. Разрывная машина для проведения испытаний на отрыв

Fig. 7. Pull test machine for conducting pull-off tests

При проведении испытания на отрыв автоматически фиксируется нагрузка,

необходимая для отрыва образца. Результаты разрывных усилий представлены на рис. 8.

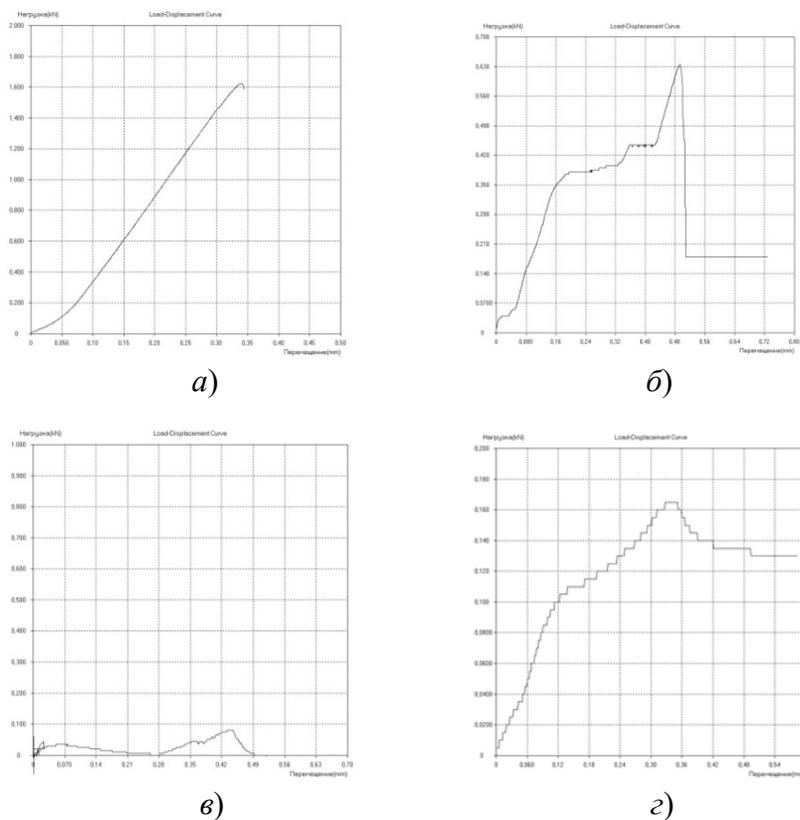


Рис. 8. Кривая распределения нагрузки при разрыве образцов:
a – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3; г – образец № 4

Fig. 8. Load distribution curve for specimen fracture:
a – sample № 1; b – sample № 2; c – sample № 3; d – sample № 4

Значения прочности при отрыве представлены в табл. 2.

2. Определение прочности на отрыв, Н

2. Determination of peel strength, Н

Номер образца	1	2	3	4
σ , Н	1599	161	85	157

Условное обозначение типов разрушений представлено на рис. 9. Авторами работы [10] подробно освещено адгезионное и когезионное разрушение.

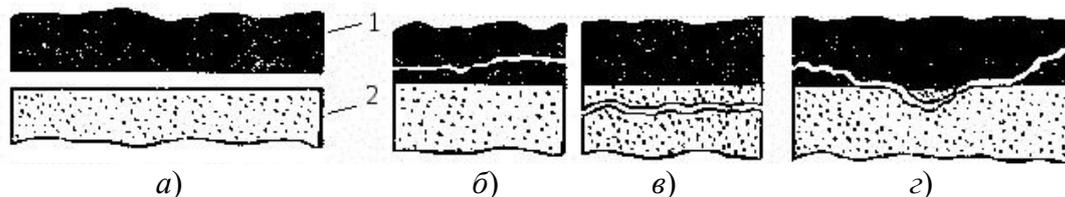


Рис. 9. Условные обозначения типов разрушения:

a – адгезионное; *б, в* – когезионное; *г* – смешанное; *1* – металл; *2* – клей

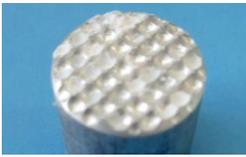
Fig. 9. Symbols of types of fracture:

a – adhesive; *b, c* – cohesive; *d* – mixed; *1* – metal; *2* – glue

Согласно классификации типов разрушения по результатам испытаний, представленных в табл. 3 определяли тип разрушения исследуемых образцов 1 – 4.

3. Тип разрушения исследуемых образцов

3. The type of fracture of the studied samples

Тип разрушения	Описание	Внешний вид образцов после испытаний	Номер образца
Когезионное разрушение	Когезионное разрушение – это разрушение клеевого соединения по клеевому шву.		4
Адгезионное разрушение между окрашиваемой поверхностью и слоем покрытия	Адгезионное разрушение – это разрушение клеевого соединения на границе клей – склеиваемый материал.		2
Когезионное разрушение слоя клея	Когезионное разрушение слоя клея – это разрушение клеевого соединения по клеевому шву.		3
Смешанное разрушение между клеем и заготовкой	Смешанное разрушение – это частичное разрушение клеевого соединения.		1

Выводы

По результатам экспериментов и оценивая полученные результаты, можно сделать вывод о влиянии формы микропрофиля на адгезию между поверхностью и покрытием. Наибольшее отрывное усилие понадобилось при разделении микропрофиля, смоделированного в виде пирамиды, что может свидетельствовать о лучших адгезионных свойствах из-за наклона микропрофиля поверхности. При разрыве образца 3, смоделированного в виде усеченного конуса, влияние наклонной боковой поверхности не наблюдалось, из-за когезионного разрушения слоя клея. Образцы 2 и 4 имеют одинаковые отрывные усилия, но из-за моделирования микропрофиля разной формы вид разрушения отличается. При разрушении образца 2 наблюдается адгезионное разрушение между клеем и заготовкой, а образец 4 – когезионное разрушение.

Полученные экспериментальные данные могут судить о возникновении различных видов разрушения при определении адгезионного взаимодействия между поверхностями, смоделированной различными микровыступами и слоем наносимого клея или ЛКМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мензилова М.Г., Лебедев О.Ю. Исследования прочности лакокрасочных покрытий на отрыв // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2024. № 2. С. 21–24. EDN MTXLKQ.
2. Барановская Л.П., Берненко Н.О. Зависимость адгезии покрытия от шероховатости // Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2017. Т. 2. С. 760–762.
3. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю. Математическое моделирование процесса репродукции микрогеометрии поверхности вала на дрессируемой полосе на основе критериев подобия и обобщенных координат // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23, № 2. С. 76–81. DOI: 10.36652/1684-1107-2025-23-2-76-81.
4. Звягина Е.Ю., Огарков Н.Н., Терентьев Д.В., Румянцев М.И. Определение диапазона колебаний параметров микрогеометрии поверхности полосы при дрессировке ее в шероховатых валах дрессировочного стана // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 1. С. 36–43.

5. Силаева А.А., Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Куршев Е.В. Исследование адгезии функциональных лакокрасочных покрытий для защиты поверхности ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103).

6. Елизарова Ю.А., Захаров А.И. Вопросы адгезии при нанесении высокотемпературных покрытий // Успехи в химии и химической технологии. 2021. № 4 (239).

7. Савельев Д.О., Михеев А.Е., Раводина Д.В. Исследование адгезии лакокрасочного покрытия с материалом подложки из алюминиевого сплава // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сб. матер. VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т., Красноярск, 12–16 апреля 2021 года. Том 1. Красноярск. Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 113–115. EDN DPJVTF.

8. Красный В.А. Оценка влияния шероховатости поверхности на повышение прочности сцепления износостойкого напыляемого покрытия // Металлообработка. 2014. № 5 (83). С. 47–51. EDN THBBER.

9. Аюрова О.Ж., Корнопольцев В.Н., Могнонов Д.М., Максимова Л.А. Адгезия пленки политетрафторэтилена к металлическим поверхностям // Вопросы материаловедения. 2011. № 3 (67). С. 96–100. EDN OFWGBV.

10. ГОСТ 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007) Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. С. 12.

REFERENCES

1. Menzilova M.G., Lebedev O.Y. Studies of the tear-off strength of paint coatings // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2024, no. 2. Pp. 21–24. EDN MTXLKQ.
2. Baranovskaya L.P., Bernenko N.O. The dependence of coating adhesion on roughness // Actual problems of aviation and cosmonautics 2017. vol. 2. Pp. 760–762.
3. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu. Mathematical modeling of the reproduction process of microgeometry of the roll surface on a trained strip based on similarity criteria and generalized coordinates // Procurement in mechanical engineering. 2025. vol. 23. no. 2. Pp. 76–81. DOI: 10.36652/1684-1107-2025-23-2-76-81.
4. Zvyagina E.Yu., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Rumyantsev M.I. Determination of the range of fluctuations in the microgeometry parameters of the strip surface during its training in rough rolls of a training mill. // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 36–43.
5. Silaeva A.A., Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Kurshev E.V. Research of adhesion and adhesive durability of functional paint coatings for protection of polymer composite surface (PCS) // Proceedings of VIAM, 2021, no. 9 (103).

6. Elizarova Yu.A., Zakharov A.I. Adhesion issues when applying high temperature coatings // Advances in chemistry and chemical technology, 2021, no. 4 (239).

7. Savelyev D.O., Mikheev A.E., Ravodina D.V. Study of adhesion of paint and varnish coating with aluminum alloy substrate material // Actual problems of aviation and cosmonautics: Proceedings of the VII-th International Scientific and Practical Conference dedicated to Cosmonautics Day: in 3 volumes, Krasnoyarsk, April 12–16, 2021. Volume 1. Krasnoyarsk. Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2021. pp. 113–115. EDN DPJVTf.

8. Krasniy V.A. Assessment of the effect of surface roughness on increasing the adhesion strength of a wear-resistant sprayed coating. // Metalworking, 2014, no. 5 (83), pp. 47–51. EDN THBBER.

9. Ayurova O.Zh., Kornopoltsev V.N., Mognonov D.M., Maksanova L.A. Adhesion of PTFE-film to metal surfaces // Voprosy materialovedeniya. 2011. No. 3 (67). Pp. 96–100. EDN OFWGBV.

10. State Standard 32702.2-2014 (ISO 16276-2:2007) Paint and varnish materials. Determination of adhesion by the tear-off technique, p. 12.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 24.12.2025; принята к публикации 16.01.2026

The article was submitted 27.11.2025; approved after reviewing 24.12.2025; accepted for publication 16.01.2026

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.02.2026. Выход в свет 27.02.2026.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+