

2. Установлено, что данная методика позволяет достоверно рассчитать коэффициенты членов модели, отвечающих за скоростное упрочнение и температурное разупрочнение материалов, поскольку исследуемые технологические режимы резания позволяют менять средние эффективные скорости деформации (effective strainrate) в широких пределах (от  $2 \cdot 10^2$  до  $1,4 \cdot 10^4$ ), что удовлетворяет требованиям адекватной статистической обработки данных эксперимента. Средняя эффективная деформация (effective strain) при этом меняется в узком диапазоне (от 1,75 до 1,92), что не позволяет получить коэффициенты члена модели, отвечающего за деформационное упрочнение, требуемой статистической значимости.

3. Получена модель определяющих соотношений в форме закона Джонсона-Кука для термообработанного материала 10X11H23T3MP-ВД для условий обработки резанием (фрезерование) со статистической достоверностью точности 78%.

Литература.

1. Tönshoff, H.K., Bussmann, W., and Stanske, C., 1986, Requirements on Tools and Machines when Machining Hard Materials, Proc. of the 26th Int. Mach. Tool and Res. Conf. pp.349-357.
2. W. Grzesik, M. Bartoszek, and P. Nieslony, "Finite difference analysis of the thermal behaviour of coated tools in orthogonal cutting of steels," International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, pp. 1451–1462, 2004.
3. Shijun Zhang, and Zhanqiang Liu, "An analytical model for transient temperature distributions in coated carbide cutting tools," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 35, pp. 1311–1315, 2008.
4. Y. Wan, Z.T. Tang, Z.Q. Liu, X. Ai, "The assessment of cutting temperature measurements in high-speed machining", in Materials Science Forum, 2004.
5. E. Merchant, Basic mechanics of the metal cutting process, J. of Applied Mechanics, 66, (1944) 168-175.
6. P.L.B. Oxley, Mechanics of metal cutting, ASME, (1963) 50-60.
7. Arrazola P.J.; Özel, T.; Umbrello, D.; Davies, M.; Jawahir, I. S. Recent advances in modelling of metal machining processes.
8. Kiliçaslan, C. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method. Master's degree thesis. İzmir Institute of Technology, Turkey, 2009.
9. A. Molinari, D. Dudzinski, Stationary shear band in high speed machining, C.R. Acad. Sciences Paris, 315 (II), (1992) 399-405.
10. M. Fontaine, A. Devillez, A. Moufki and D. Dudzinski, Predictive force model for ball end milling and experimental validation with a wavelike form machining test, Int. J. Machine Tools and Manufacture, 46, (2006) 367-380.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Сапрыкин, к.т.н., Н.А. Сапрыкина, к.т.н., Е.А. Ибрагимов

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского

Томского политехнического университета

652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)-6-26-83

E-mail: sapraa@tpu.ru

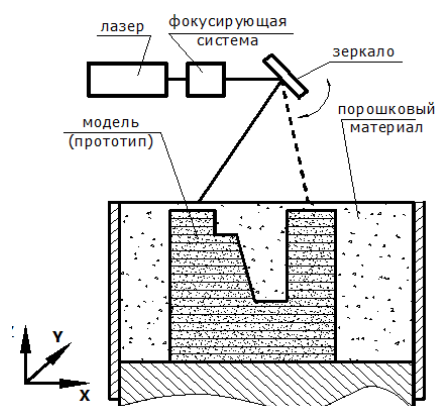


Рис. 1. Принципиальная схема процесса селективного лазерного спекания

На сегодняшний день существует большое разнообразие технологий быстрого прототипирования. Они используют различные физические процессы и материалы для создания прототипов: стереолитография – послойное отверждение жидкого мономера лучом УФ-лазера посредством светового воздействия; LOM-технология использует листовые материалы, вырезанные лучом лазера; FDM-технология – послойная укладка расплавленной полимерной нити; селективное (избирательное) лазерное спекание – СЛС. Согласно этому процессу прототипы создаются из порошковых материалов за счет эффекта спекания при помощи термического воздействия лазерного луча [1,2,10].

Данное исследование проводилось для технологического обеспечения процесса селективного

лазерного спекания порошковых материалов.

Анализ литературных данных показал, что СЛС является одним из самым перспективных процессов послойного синтеза, т.к. имеется обширный выбор модельных материалов, как металлов, так и неметаллов, а также возможность получения полностью функциональных изделий.

Т.к. качество поверхности спекаемого изделия зависит напрямую от толщины спекаемого слоя (рисунок 2), то было необходимо оценить величину влияние режима лазерного воздействия на его размеры.

Лазерное термическое спекание обусловлено воздействием интенсивного потока лазерного излучения на локальный участок поверхности порошка, поглощением лазерного излучения приповерхностным слоем материала и, вследствие этого, почти мгновенным разогревом этих участков до высоких температур [3,4,5,6,8]. После прекращения воздействия лазерного излучения происходит быстрое охлаждение данного участка за счет теплопроводности во внутренние объемы материала, а также за счет теплоотдачи с поверхности. Поэтому для разработки теории спекания порошковых материалов лазерным излучением можно применить с некоторыми изменениями известные данные по лазерной поверхностной закалке и лазерной сварке тонких листов, так как эти процессы почти идентичны [5,6,7]. Для теоретической оценки была применена формула, представленная в работах академика АН СССР Рыкалина Н. Н., для импульсного лазерного воздействия на поверхность материала при лазерной обработке [6].

При кратковременном воздействии импульсом излучения на поверхность. В материале возникает температурное поле, имеющее осевую симметрию (рисунок 3). В случае коротких импульсов основной поток теплоты в материале распространяется по нормали к поверхности.



Рис. 2

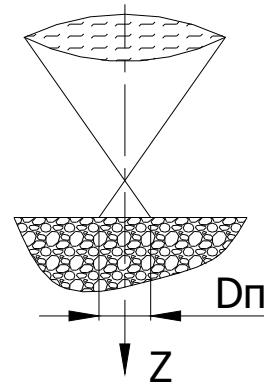


Рис. 3

Следовательно, задачу теплопроводности можно рассматривать как одномерную по оси  $Oz$  (по глубине) [5,6,7]. Одномерное температурное поле, создаваемое в полубесконечном теле однородным лучом круглого сечения радиусом  $r_n$ , при  $t > \tau_u$  имеет вид:

$$T(z,t) = \frac{2q_n \sqrt{a}}{\lambda_T} \left[ \sqrt{t} i\Phi \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{t - \tau_u} i\Phi \left( \frac{\sqrt{z^2 + r_n^2}}{2\sqrt{a(t - \tau_u)}} \right) \right],$$

где  $t$  – время, отсчитываемое после окончания действия импульса лазерного излучения;

$z$  – расстояние, отсчитываемое по оси  $Oz$  (рисунок 3);

$i\Phi$  – функция интеграла вероятности [9];

$a = \lambda_T / (c\gamma)$  – коэффициент температуропроводности материала;

$c\gamma$  – коэффициент объемной теплоемкости.

При ее упрощении  $r_n \gg \sqrt{at}$  [5,7] получается формула для приближенных расчетов глубины термического лазерного воздействия:

$$T(z,t) \approx \frac{q_n}{\lambda_T} \left( 2\sqrt{\frac{at}{\pi}} - z \right), \text{ где } z \text{ – глубина прогрева до } T(z,t)$$

В результате было принято условие, что величина спеченного слоя определяется зоной, где была достигнута температура спекания исходного материала.

На рисунках 4-6 представлены графики зависимости глубины спекаемого слоя медного порошка ПМС-1 [11] от различных режимных параметров лазерной обработки. Из них видно, что наибольшей величины регулирования толщины спекаемого слоя можно добиться изменением величины плотности мощности в импульсе лазерного излучения (рисунок 6). Также данный параметр, как принято в лазерных технологиях [4,5], является ограничивающим максимальную и минимальную толщину спекаемого слоя.

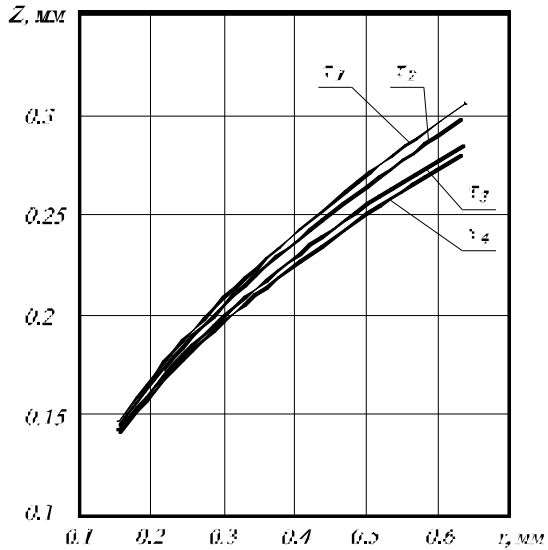


Рис. 4. График зависимости глубины спекаемого слоя от радиуса лазерного пятна ( $\tau_1=2$ мс,  $\tau_2=2,5$ мс,  $\tau_3=4$ мс,  $\tau_4=5$ мс)

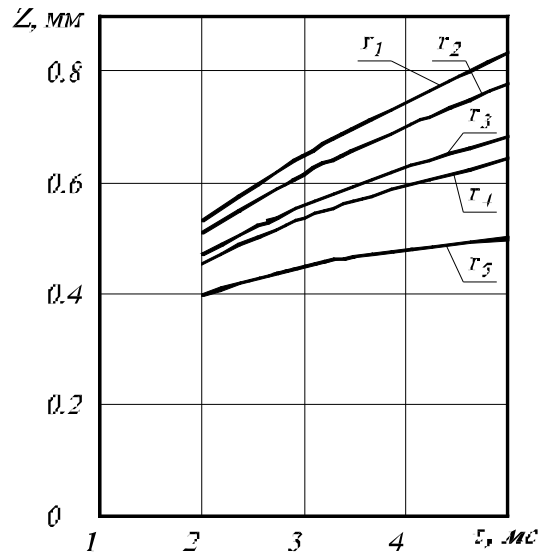


Рис. 5. График зависимости глубины спекаемого слоя от длительности импульса ( $r_1=0,15$ мм,  $r_2=0,3$ мм,  $r_3=0,45$ мм,  $r_4=0,5$ мм,  $r_5=0,65$ мм)

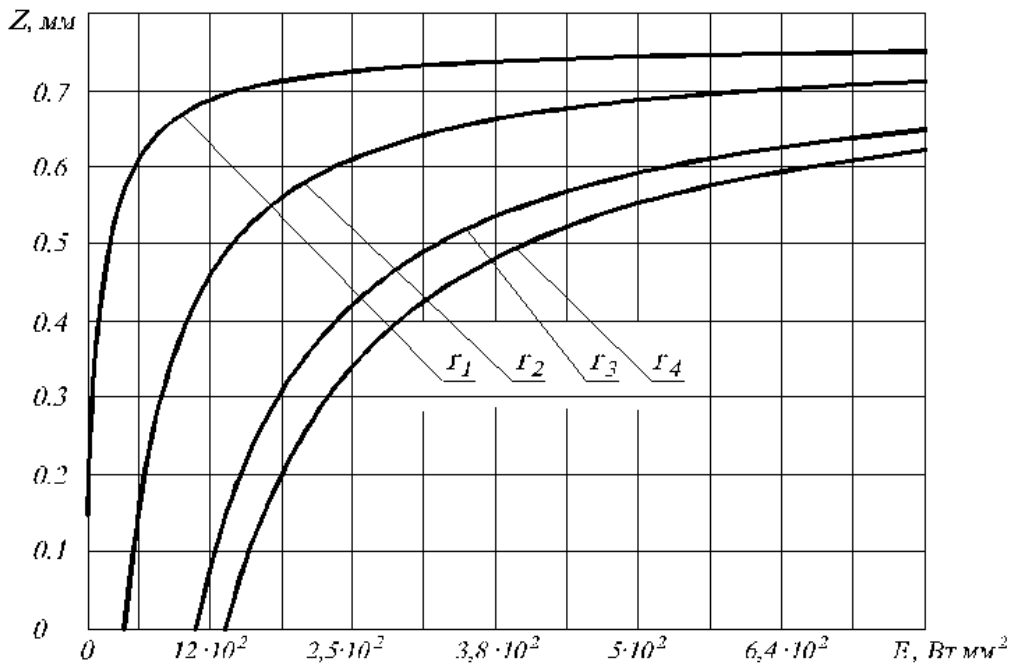


Рис. 6. График зависимости глубины спекаемого слоя от плотности мощности в импульсе ( $r_1=0,15$ мм,  $r_2=0,3$ мм,  $r_3=0,45$ мм,  $r_4=0,5$ мм,  $r_5=0,65$ мм)

Так как порошковый материал не является однородным телом и определение его теплопроводности аналитическим путем затруднительно, поэтому для предварительных расчетов применена эквивалентная теплопроводность [12].

Для более точного расчета размеров спекаемого слоя, теплофизические характеристики порошковых материалов определялись экспериментально. Для этого был применен импульсный метод [13]. Экспериментальная установка, включала в себя лазерную установку, милливольтметр, термопару (хромель-алюмель) и цифровую видеокамеру. По результатам экспериментов были получены графики изменения температуры в контрольной точке, и рассчитаны теплофизические характеристики порошков, необходимые для расчетов.

В процессе исследования ставилась задача определения величины влияния импульсного лазерного излучения на различные порошковые материалы, а также экспериментально определить зависимости толщины и ширины спекаемого слоя порошка от технологических параметров лазерного излучения. В результате были получены спеченные опытные образцы и проведены их оценка и измерение.

Для проведения исследований в качестве спекаемых материалов были выбраны следующие порошки: медный порошок, порошок конструкционной стали, полимерный порошок и их смеси (рисунок 7).

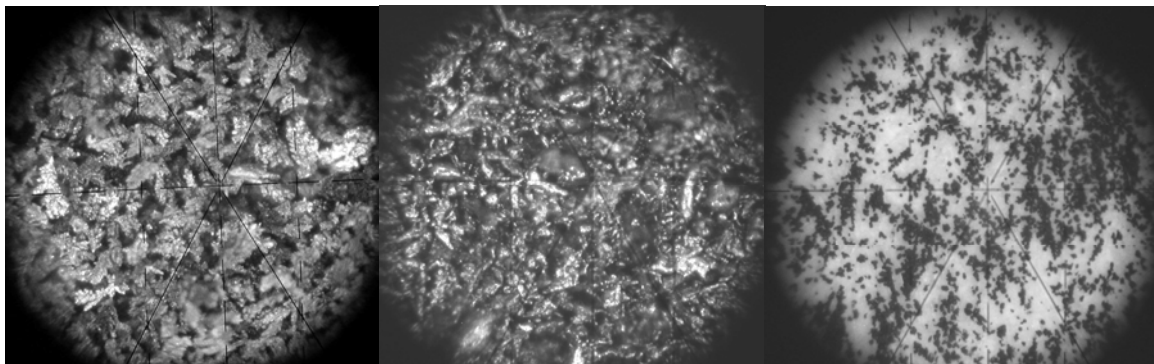


Рис. 7. Фотографии исходных порошков ( $\times 150$ )

а) медный порошок ПМС-1; б) порошок конструкционной стали; в) тонер от лазерного принтера

При проведении экспериментов изменялась частота следования импульсов и мощность лазерного излучения, а также фиксировалась энергия излучения. Диаметр лазерного пятна и скорость его перемещения оставались постоянными. Эксперименты проводились до момента появления явных дефектов спеченного слоя, таких как усадка и раковины (рисунок 8).

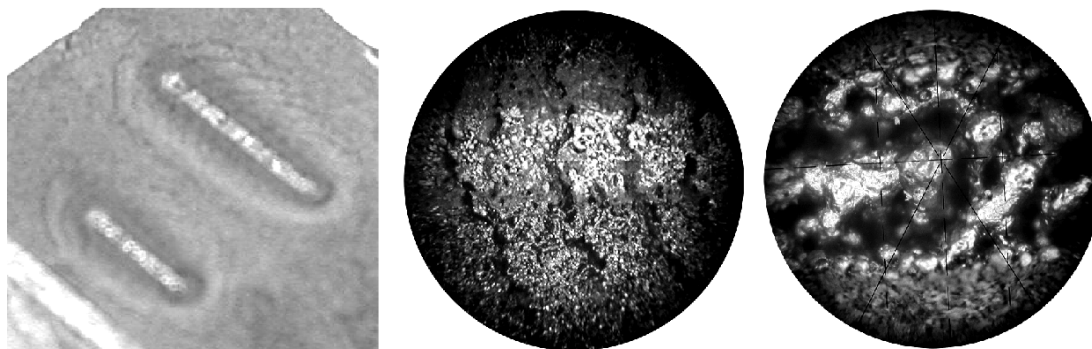


Рис. 8. Дефекты спеченного слоя порошка

В ходе проведенной работы было получено большое количество образцов, у которых измерялась глубина и ширина спеченного слоя. По результатам измерений были построены графики зависимости ширины и глубины спеченного слоя порошка от плотности мощности лазерного излучения (Рисунок 9).

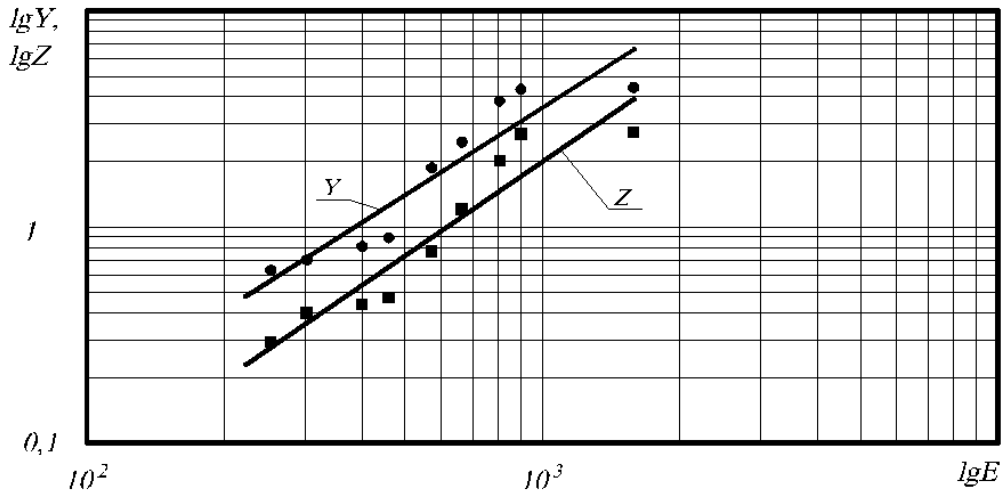


Рис. 9

Графоаналитическая обработка экспериментальных результатов позволила получить эмпирические зависимости глубины и ширины спекаемого слоя от плотности мощности лазерного излучения [14,15]:

- для глубины спеченного слоя  $Z = C_z \cdot E^{X_z}$  ;

- для ширины спеченного слоя  $Y = C_y \cdot E^{X_y}$  ;

где:  $C_y, C_z, X_y, X_z$  – коэффициенты, значения которых приведены в таблице:

Коэффициенты	Частота следования импульсов		
	1 Гц	2 Гц	5 Гц
$C_y$	$4 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-5}$
$C_z$	$10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-5}$
$X_y$	1,3324	1,1526	0,9605
$X_z$	1,4342	1,4923	0,9063

В результате проведенных экспериментов установлено, что имеется возможность изменения толщины спекаемого слоя в значительных пределах за счет изменения технологических режимов лазерной обработки. Сделан вывод о том, что применение металлических порошков в «чистом» виде без защитной среды ограничено, т.к. происходит их интенсивное окисление. Для снижения коэффициента отражения исходного модельного материала, уменьшения окисления и повышения прочности спеченного прототипа необходимо применять полимерную составляющую. Также показана возможность применения импульсного лазерного излучения для послойного лазерного синтеза изделий сложной формы из порошковых материалов и даны рекомендации по выбору рациональных режимов лазерного воздействия.

Литература.

1. Васильев В.А., Васильев Н.В., Максимов Н.М. Получение отливок методами быстрого прототипирования для ювелирно-художественной промышленности//Литейщик России. – 2003. – №9. – С.20 – 28.
2. Шиганов И.Н. Современные методы быстрого прототипирования с применением лазерного излучения //Технология машиностроения. – 2005. - №10. – С.65 – 71.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с.
4. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Под редакцией лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора С.П. Митрофанова. Лениздат. 1973. – 191 с.
5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мирюсов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 -664 с.
6. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник/ Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

7. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: Учебное пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов; Под. ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк. 1988. – 159 с.
8. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение свойств и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
9. Нащекин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 469 с.
10. Добринский Е.С., Сеин В.А., Суслов Ан. А. Прогрессивные технологии и материалы в автомобилестроении//Технология машиностроения. – 2006. - №1. – С.88 – 94.
11. Материаловедение и технология металлов: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов, Н. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др.; Под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высш. шк., 2001. – 638 с.
12. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
13. Платунов Е.С. и др. Теплофизические измерения и приборы. – Л.: Машиностроение, 1986
14. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004.– 204 с.
15. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

### ТЕОРИЯ ГРАФОВ И ЕЁ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

*С.Н. Евстафьев, студент гр. 17В30, С.В. Соколова, доцент*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского*

*Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*E-mail:svetlanaeno@mail.ru*

Родоначальником теории графов принято считать математика Леонарда Эйлера (1707-1783).

Первая работа о графах принадлежала Л.Эйлеру и появилась в 1736 году. В дальнейшем над графами работали Кениг (1774 -1833), Гамильтон (1805-1865), из современных математиков – К. Берж, О. Оре, А. Зыков.

**Графом** называется совокупность конечного числа точек, называемых вершинами графа, и попарно соединяющих некоторые из этих вершин линий, называемых ребрами или дугами графа.

Физической визуализацией графов является например сеть автомобильных дорог.

Вершины обозначаем номерами. Ребра показывают любыми линиями.

Чаще всего вершины обозначают латинскими буквами. Иногда граф в целом будем обозначать одной заглавной буквой.

Вершины графа, которые не принадлежат ни одному ребру, называются **изолированными**.

Граф, состоящий только из изолированных вершин, называется **нуль-графом**.

Граф, в котором каждая пара вершин соединена ребром, называется **полным**.

**Степенью вершины** называется число ребер, которым принадлежит вершина.

**Цепь** – это маршрут без повторений ребер

**Цикл** – это замкнутая цепь.

Две вершины А и В в графе называются **связными** (несвязными), если в нем существует (не существует) путь, ведущий из А в В. Граф называется **связным**, если каждые две его вершины связаны; если же в графе найдется хотя бы одна пара несвязных вершин, то граф называется несвязным.

**Дерево** – это граф без циклов.

Несвязный граф, состоящий исключительно из деревьев, называется **лесом**.

Существует ряд способов задания графов. Здесь мы перечислим некоторые, наиболее известные способы:

*Матрица инцидентности.*

*Матрица смежности.*

